

**LE ROLE BIOLOGIQUE DU CUIVRE
CHEZ LES RUMINANTS :
LES RELATIONS SOL – PLANTE – ANIMAL**

T H E S E

présentée

à l'Université Claude-Bernard de Lyon

(Médecine-Pharmacie)

et soutenue publiquement le 10 janvier 1980

pour obtenir le grade de Docteur Vétérinaire

par

Alain CHACORNAC

né le 24 avril 1953

au Brignon



**LE ROLE BIOLOGIQUE DU CUIVRE
CHEZ LES RUMINANTS :
LES RELATIONS SOL — PLANTE — ANIMAL**

T H E S E

présentée

à l'Université Claude-Bernard de Lyon

(Médecine-Pharmacie)

et soutenue publiquement le 10 janvier 1980

pour obtenir le grade de Docteur Vétérinaire

par

Alain CHACORNAC

né le 24 avril 1953

au Brignon



LES RELATIONS SOL - PLANTE - ANIMAL CHEZ LES RUMINANTS : LE RÔLE BIOLOGIQUE DU CUIVRE

THÈSE

présentée

à l'Université Claude-Bernard de Lyon

(Médecine-Vétérinaire)

et soutenue publiquement le 10 janvier 1980

pour obtenir le Doctorat Vétérinaire



Alexis CHACORNAC

né le 24 avril 1953

au Brignais



PERSONNEL ENSEIGNANT DE
L'ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE LYON

Directeur : Monsieur le Professeur COTTEREAU

Directeurs Honoraires : Monsieur le Professeur TAPERNOUX

Monsieur le Professeur FLORIO

Monsieur le Professeur FROGET

PROFESSEURS

Pharmacie, toxicologie : M. LORGUE

Anatomie descriptive, Extérieur, Anatomie appliquée : M. BARONE

Physiologie, Thérapeutique, Pharmacodynamie : M. BOST

Histologie, Embryologie, Anatomie pathologique : M. TISSEUR

Hygiène et Industrie des Aliments d'Origine Animale :

M. CHANTEGRELET

Parasitologie, Maladies parasitaires : M. EUZEBY

Pathologie médicale des Equidés et des carnivores, Législation
vétérinaire : M. FONTAINE

Pathologie Médicale du Bétail et des animaux de basse-cour :

M. COTTEREAU

Technique chirurgicale, Pathologie chirurgicale : M. COULON

Obstrétrique, Pathologie de la Reproduction : M. BERTRAND

Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie : M. OUDAR

Ethnologie, Zootechnie, Economie rurale : M. FROGET

Botanique appliquée, Agronomie, Alimentation: M. WOLTER

Physique et Chimie biologiques et médicales : M. DELATOUR

Maladies contagieuses, Zoonoses, Législation sanitaire : M. JOUBERT

Professeurs sans chaire

MM. BOIVIN, DESCHANEL, GASTELLU, JEAN-BLAIN, LAPRAS, M^{le} LAVAL,
MM. LE NIHOUANEN, PRAVE.

Maître assistant agrégé

M. FRANCK

Maîtres assistants

M. BELLI, M^{me} CHAUVE, M^{le} COURSAT, MM. DEMONT, DESCOTES, EUZEBY,
FAU, GARNIER, GEVREY, GOUY, KECK, LEGEAY, NEYRET, M^{me} RACHAIL,
M. RICHARD.

Assistants

MM. BARRAT, BENOIT, BEZEAUD, M^{me} CHAPPUIS, MM. CHARLET, CHOMEL,
DENOIX, M^{le} FAUBLEE, M^{me} FOURNEL, MM. FRESNAY, GENIN, M^{me} HACHLER,
MM. JAUSSAUD, MAY, NGO TAN HUNG, THIEBAULT, THIEVENAZ.

Examineurs de la thèse

Président : Monsieur le Professeur BERTOYE,
de la Faculté de Médecine.

Premier Assesseur : Monsieur le Professeur WOLTER
de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Lyon.

Deuxième Assesseur : Madame le Professeur LAVAL
de l'Ecole Vétérinaire de Lyon.

L'Université Claude Bernard de Lyon (Médecine - Pharmacie) et l'Ecole Nationale Vétérinaire de Lyon, déclarent que les opinions émises dans les dissertations qui leur sont présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elles n'entendent leur donner ni approbation ni improbation.

A MA FEMME,
avec tout mon amour.

A MES PARENTS,
qu'ils trouvent ici le témoignage de ma grande affection
et de ma sincère reconnaissance pour tous les sacrifices
qu'ils ont réalisés.

A MA FAMILLE,

A MES AMIS.

A Monsieur le Professeur BERTOYE,

Professeur à la Faculté de Médecine de Lyon,
qui nous a fait le très grand honneur d'accepter
la présidence de notre jury de thèse, hommages
respectueux.

A Monsieur le Professeur WOLTER,

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Lyon,
par la qualité de son enseignement il a su nous
sensibiliser à l'alimentation animale.
Sincère reconnaissance.

A Madame le Professeur LAVAL,

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Lyon,
elle nous a inspiré ce travail et en a assuré la correc-
tion ; qu'il nous soit permis de lui adresser nos plus
vifs remerciements.

Au Docteur Michel LAMAND

Station de Physiopathologie de la Nutrition

I.N.R.A. - C.R.Z.V. Theix

qui a généreusement mis à notre disposition les
documents nécessaires à la réalisation de ce travail,
qu'il soit assuré de notre profonde reconnaissance.

A tous nos maîtres de l'Ecole Nationale Vétérinaire de
Lyon.

ABREVIATIONS

- A.R.C. : Agricultural Research Council (G.B.)
N.R.C. : National Research Council (U.S.A.)
I.N.R.A. : Institut National de la Recherche Agronomique (France)
I.T.C.F. : Institut Technique des Céréales et des Fourrages
C.R.Z.V. : Centre de Recherches Zootechnique et Vétérinaire
p.p.m. : partie par million (= mg/kg)
M.S. : Matière sèche
< : inférieur à ; moins de
> : supérieur à ; plus de
10 p. 100 : 10 pour 100
S.O.D. : Super Oxyde Dismutase
Cu : Cuivre
Mo : Molybdène
S : Soufre
Co : Cobalt
T.C.P. : tube contourné proximal.

I N T R O D U C T I O N

La présence de cuivre dans les tissus animaux et végétaux a été révélée il y a plus de 150 ans. Mais cette existence était considérée comme accidentelle.

Les premières données relatant l'importance des oligo-éléments apparaissent à la fin du 19ème siècle. Les chercheurs concentrent leur attention sur certains composés animaux renfermant des métaux variés mais sans que leur intérêt biologique ne soit soupçonné.

C'est ainsi que sont découverts : la Turacine -porphyrine contenant du cuivre dans les plumes de certains oiseaux (1869)- ; l'hémocyanine -autre protéine à base de cuivre dans le sang des escargots (1878)- ; la Sycotypine pigment contenant du zinc dans le sang des mollusques (1906) ; et un composé respiratoire renfermant du Vanadium dans les ascidies (outres de mer) (1911).

Pendant de nombreuses années ces substances biologiques ont été considérées comme des curiosités scientifiques. Mais des recherches, menées en France par Claude Bernard et en Angleterre par Mac Munn, sur la respiration cellulaire et le fer ainsi que sur les procédés oxydatifs, ont ouvert le chemin de la découverte des métallo-enzymes et des phénomènes de catalyse par ces mêmes métallo-enzymes. A la même époque Chatin reliait l'apparition du goître humain à la déficience en iode de l'environnement (sol, eau et aliments).

Dans le premier quart du 20ème siècle les progrès furent lents ; la spectrographie d'émission permet de définir la composition minérale des plantes et des tissus animaux. La notion de "trace elements" chez les anglo-saxons, ou d'oligoéléments chez les auteurs français apparaît et Gabriel Bertrand en 1912, les définit comme "des éléments présents à l'état de traces" dont l'existence apparaît "tout à fait générale, indépendante à la fois des temps et des lieux, des espèces et des tissus".

Leur rôle biologique s'affirme dans le 2ème quart du 20ème siècle. En 1928 E.B. Hart aux U.S.A. montre que le cuivre ajouté au fer est un élément indispensable à la croissance et à la synthèse de l'hémoglobine chez le rat. Peu de temps après le même groupe de chercheurs montre que le zinc et le manganèse jouent un rôle essentiel dans la nutrition des mammifères. En 1931 la déficience en cuivre sur du bétail au pâturage est démontrée en Hollande et aux U.S.A.. En 1933 la toxicité aiguë et chronique du sélénium est mise en cause dans "l'alkali disease" et "le blind staggers" aux U.S.A.. La même année Sjollem en Hollande découvre que la carence en cuivre est responsable du "lechsucht" ou "maladie de réclamation" sur les ovins et les bovins, et met ainsi l'accent sur une liaison carencielle fondamentale, la liaison végétal-animal. En 1935 le cobalt est reconnu comme responsable du "Wasting disease" sur les ruminants. En 1936 la déficience alimentaire en manganèse est déterminée comme cause du pérosis et de la chondrodystrophie nutritionnelle sur les volailles. En 1937 Bennett et Chapman montrent que le "sway-back" (ataxie enzootique) sur les agneaux est une conséquence d'une déficience en cuivre sur les brebis. Quelques années après, l'intoxication chronique au cuivre sur les ovins et les bovins se révèle comme conséquence d'une haute teneur en cuivre des herbages ou d'une teneur normale mais d'un taux de molybdène anormalement bas.

De nombreux laboratoires découvrent une remarquable variété de fonctions mettant en jeu le cuivre ; ainsi les défauts de pigmentation, de kératinisation de la laine, de formation des os, de reproduction, de myélinisation de la moelle épinière, de fonctionnement cardiaque et de synthèse du tissu conjonctif, ajoutés au ralentissement de croissance et aux troubles de l'hématopoïèse, sont considérés comme des manifestations de la carence en cuivre.

Dans les années 1950 Dick découvre les interrelations cuivre-molybdène et sulfates : le concept d'équilibre entre les oligoéléments est né. D'autres interrelations se dessinent entre

manganèse et fer, cuivre, zinc et fer, zinc et cadmium, arsenic et sélénium Les carences secondaires ou induites sont révélées. Le molybdène et le sélénium sont étudiés en tant qu'oligoéléments essentiels à partir de 1960.

Ces vingt dernières années les progrès réalisés en matière d'analyse et en enzymologie permettent de cerner le rôle des oligoéléments au niveau cellulaire. En particulier la spectrométrie d'absorption atomique autorise des dosages précis et rapides ; le rôle de nombreuses métallo-enzymes est défini. Parallèlement, différents organismes (A.R.C., N.R.C., I.N.R.A.) ont précisé les normes concernant les besoins des différentes espèces animales.

Depuis une dizaine d'années les modernisations agronomiques et zootechniques ont pénétré le monde agricole. Ces transformations se sont exercées au niveau des trois supports de l'élevage : le sol - la plante - l'animal, en perturbant plus ou moins chacun de ces niveaux :

- Au niveau du sol, les erreurs agronomiques, résultants de l'emploi massif et inconsidéré des amendements et des fertilisants, rendent les fourrages plus pauvres en certains macro ou micro-éléments, ou déséquilibrés au profit d'un ou de plusieurs éléments.

- Au niveau de la plante l'intensification fourragère peut faire varier dans des proportions importantes la composition en oligoéléments des récoltes.

- Au niveau de l'animal la sélection génétique, en vue d'obtenir des performances zootechniques plus poussées, a souvent profondément modifié le niveau des exigences et le seuil d'apparition de certaines maladies métaboliques.

C'est pour ces raisons qu'une étude des carences (et à un degré moindre des toxicités) au niveau de l'animal ne peut être réalisée qu'en remplaçant le sujet dans son contexte environnemental.

Dans ce travail, nous préciserons tout d'abord le comportement du cuivre dans le sol afin de cerner les aires géographiques de carence.

Puis nous aborderons l'étude de la teneur en cuivre des fourrages et de ses facteurs de variation en insistant sur l'influence des techniques culturales modernes.

Ensuite nous envisagerons successivement le rôle du cuivre chez le ruminant, les besoins, les conséquences cliniques d'un déficit ou d'un excès.

Enfin nous expliciterons les méthodes de traitement et de prophylaxie applicables tant au niveau sol-plante qu'au niveau animal.

I - LE CUIVRE AU NIVEAU DU SOL

C'est dans le sol que la plante trouve, dans les conditions normales, le cuivre dont elle a besoin. Or la quantité susceptible d'être absorbée ne représente qu'une fraction (de 8 à 50 p. 100) du cuivre total (141). L'importance de cette fraction absorbable est subordonnée aux formes sous lesquelles le cuivre se trouve dans le sol, à la dynamique de cet élément dans les différents types de sol. L'étude géochimique et pédologique nous apporte davantage de précisions et débouche sur la présentation d'une carte des carences potentielles en France.

Nous donnerons aussi quelques notions sur le comportement du molybdène dans le sol, en vue de préciser certains seuils de toxicité susceptibles d'être rencontrés et conduisant à des carences induites au niveau de l'animal.

A - GEOCHIMIE DU CUIVRE

=====

1 - Les formes du cuivre dans le sol

Les différentes formes que revêt le cuivre dans le sol sont étroitement liées à celles d'autres constituants issus de l'altération de la roche au cours de la pédogénèse (147).

a - Produits d'altération de la roche

Les processus mis en jeu lors de la formation des sols sont regroupés dans la figure 1 (51).

a.1 - La roche est soumise à des phénomènes de désagrégation mécanique, de dissolution, d'hydratation, d'hydrolyse etc., qui conduisent à la transformation progressive des minéraux primaires constitutifs avec (147) :

- modification de certaines macrostructures cristallines rigides (mica, feldspath) en microstructures gonflantes à grande surface d'absorption, les argiles d'altération ;

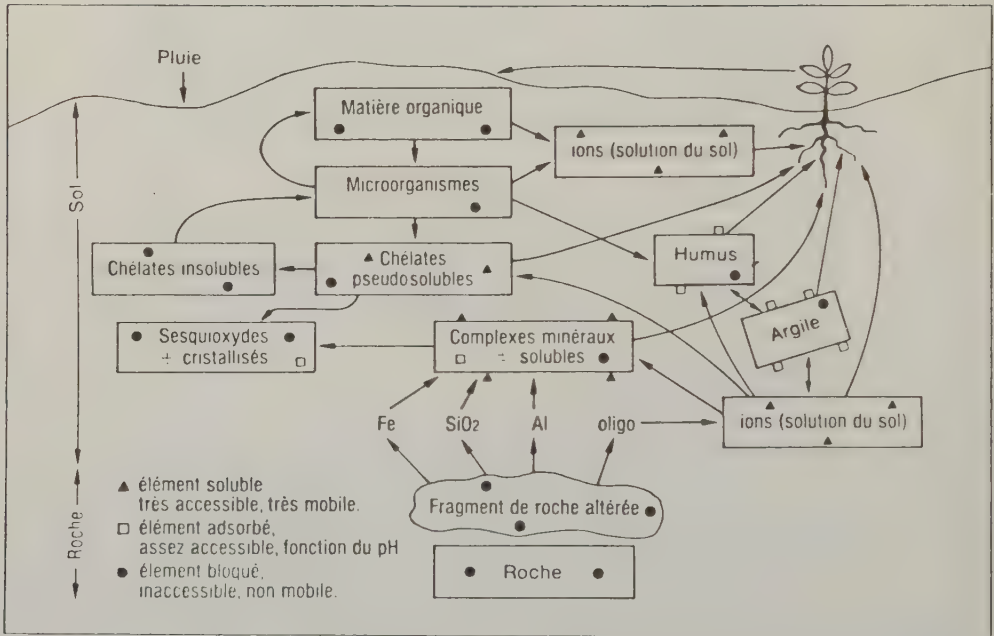


Figure 1: Dynamique des oligo-éléments dans les sols.

- libération, dans la phase aqueuse du sol, des éléments chimiques constitutifs des minéraux primaires et secondaires (silice, fer, aluminium, manganèse, alcalins, alcalino-terreux et oligoéléments) ;

- formation d'hydroxydes complexes de fer et d'alumine plus ou moins hydratés, à grande surface d'adsorption, et qui se transforment peu à peu en oxydes, incluant les ions précédemment absorbés ;

- formation de complexes pseudosolubles ferri-aluminosiliciques qui précipitent ou se dissocient selon les conditions de concentration et de pH dans le sol.

a.2 - La matière organique du sol, parallèlement, en provenance de débris animaux, végétaux et microbiens, accumulés en surface, est dégradée et est à l'origine de nouveaux constituants fondamentaux (141, 147) :

- les colloïdes humiques à très forte électronégativité ;
- certains acides organiques à propriétés chélatantes vis à vis des éléments chimiques.

a.3 - Le sol est donc un milieu chimiquement complexe dans lequel les structures cristallines inertes de la roche-mère, sont remplacées par de nouvelles dont certaines sont particulièrement "actives" (argiles, hydroxydes, colloïdes humiques, agents chélatants) (147).

b - Sites et mobilité du cuivre

Le cuivre occupe (figure 1) des sites divers bien précis qui correspondent à des formes plus ou moins mobiles dans le sol et plus ou moins accessibles à la végétation (90, 141) (Tableau I).

b.1 - Les formes solubles et pseudosolubles présentes dans la solution du sol sont soit à l'état d'ions (Cu^{++} , Mo^{6-}), soit à l'état de complexes minéraux (liés au fer,

TABLEAU I : Cu-Mo dans les sols (formes et teneurs en ppm)

				Teneurs dans les sols				
Formes très mobiles (*)	Formes assez mobiles	Formes bloquées	Total	Extractible		Références		
				Carence	Toxicité			
Cu ⁺⁺	Cu échangeable	Inclus (**)	10.100	7.8	100 au	Coppenet 68		
Cu OH ⁺		Cu Fe S2			pH < 6	Drouineau et al. 1962		
Cu chélaté		Lié (***)		0,3.10	EDTA 0,05 M.	Mitchell 1965		
MoO4 ⁻⁻ , MoO3 ⁻	Mo2 O5	Inclus *	0,3.7					
Chélate	Mo O2	Molybdate - Ca			> 1,5			
échangeable (alcalin)	échangeable (acide)	Oxydes hydratés		0,15		Coppenet (1968)		
					Oxalate NH3 pH 3,3			

* soulignée : la forme la plus représentée dans le sol

** Inclus dans les minéraux résiduels ou les argiles

*** Lié à la matière organique stable

à la silice et à l'aluminium), soit à l'état de chélates organiques. Toutes sont mobiles donc lessivables vers la profondeur ; elles sont "assimilables" par la plante surtout sous les formes ionisées.

b.2 - Les formes adsorbées à la surface des colloïdes argileux ou humiques, ou hydroxylées (Cu^{++} , Mo O_4^{--}) sont mobiles dans le profil dans la mesure où leurs colloïdes le sont, c'est-à-dire lorsqu'ils sont à l'état dispersé (insuffisance d'ion Calcium). Elles peuvent être absorbées par les plantes, mais il y a ici compétition entre l'énergie d'adsorption du sol et la capacité d'absorption de la racine. Le pouvoir de rétention du sol varie avec l'ion et avec le pH. Ainsi le cuivre (cation) est surtout lié aux colloïdes électronégatifs (argiles, humus) et ceci d'autant plus que le pH est basique (19).

b.3 - Les formes incluses dans les hydroxydes de fer et d'aluminium sont mobiles et semblent accessibles dans les précipités frais encore amorphes, mais sont totalement "bloquées" par les oxydes bien cristallisés et déshydratés (oxydes vieillis ou formés en conditions relativement sèches) (141, 147).

b.4 - Les formes précipitées à l'état de sel dès que le produit de solubilité est atteint, sont peu importantes dans les sols pour les phosphates de manganèse, cuivre, zinc, pour les molybdates de fer et calcium. Mais le phénomène est fondamental pour les sulfures et surtout les hydroxydes.

b.5 - Les formes incluses dans les minéraux résiduels de l'altération et retrogradées dans le réseau des argiles sont immobilisées, au moins à court terme, et inaccessibles à la végétation.

b.6 - Les formes incluses dans les résidus organiques et les chélates insolubilisés sont bloquées et inaccessibles tant qu'elles ne sont pas libérées par la dégradation microbienne.

c - Equilibres entre les différentes formes

Les différentes formes recensées ne sont pas définitivement mobiles ou bloquées, mais subissent au cours du temps des évolutions plus ou moins rapides et tendent à réaliser certains équilibres entre elles et le milieu (147).

Ainsi :

- les formes incluses dans les minéraux résiduels constituent une réserve lentement libérable au cours des siècles par les processus d'altération ;

- les formes organiques non solubles peuvent être rapidement mobilisées par les processus de minéralisation, mais les éléments libérés peuvent être réutilisés pour la néosynthèse microbienne ; la vitesse et le sens de la réaction sont fonction du type de matière organique, de la flore microbienne, du pH, de la température et de l'humidité etc. (II).

- dans la phase liquide la proportion entre formes minérales et organiques dépend de la stabilité des complexes. Le zinc et surtout le cuivre sont particulièrement bien "séquestrés" et participent moins que les autres éléments à ce genre d'équilibre ; mais ils peuvent être "décomplexés" par l'action microbienne ;

- enfin les ions adsorbés par les colloïdes sont en équilibre avec les ions présents dans la solution du sol, ce qui limite la mobilité et l'assimilabilité de ces derniers ; cet équilibre dépend du pH.

d - Facteurs d'équilibre

Lorsque la solution du sol tend à s'appauvrir, soit par lessivage des pluies, soit par absorption des plantes, des phénomènes de dissolution et désorption tendent à rétablir l'équilibre ; mais il y a toujours compétition entre les besoins des plantes et les micro-organismes du sol. L'équilibre, à un instant donné, est, pour chaque élément, le résultat de réactions simultanées plus ou moins compétitives, spécifiques de l'élément dans les conditions de milieu du moment (147).

Hodgson (90) et Mitchell (141) ont montré que les variations de condition du milieu, qu'elles soient naturelles ou induites par l'homme modifient d'autant plus les équilibres en jeu que les propriétés physicochimiques de l'élément varient avec le facteur en cause.

Les équilibres instantanés entre les différentes formes sont régis par trois facteurs (19, 141) :

- le pH qui gouverne les réactions d'échanges d'ions et de précipitation ; la mobilité du cuivre est peu réduite par des variations de pH mais une augmentation de celui-ci affecte beaucoup la mobilité du molybdène.

- le potentiel d'oxydo-réduction qui modifie la solubilité des ions en fonction de leur valence. Les variations dues à l'aération et à l'humidité affectent surtout les éléments qui changent de valence (141). Mais la formation en milieu anaérobie, d'acides organiques très chélatants, rend également plus mobiles le molybdène, et à un degré moindre, le cuivre (90).

2 - Fraction absorbable par les plantes

La plante ne peut absorber que deux formes : les ions dissous dans la solution du sol et les ions adsorbés (19). Le cuivre adsorbé étant très énergiquement retenu par le sol, la fraction accessible aux racines est surtout représentée par les chélates organiques de la solution du sol (Tableau I).

Des variations de pH, d'intensité de drainage etc., font que cette fraction accessible aux plantes n'est pas pour un sol donné, constante dans le temps (19). La fraction assimilable doit donc, pour être caractéristique du sol, être définie en fonction de procédés d'extractions conventionnels.

3 - Conséquences sur les analyses de sols

a - Variation de la composition dans le temps et dans l'espace

- Dans le temps les variations de teneurs en oligo-

TABLEAU II : Variation des teneurs en Cuivre du sol avec la profondeur (Dautria 1970)

Horizon	Profondeur (cm)	Cu Total (p.p.m.)	Cu extract. (ppm)
A1	0 à 10	7,5	0,4
(B) C	10 à 40	26	0,17
C	40 à 80	17,3	0,07
Granite altéré ...	100	3	0,4

éléments sont fonction des pluies, de l'activité microbienne (humidité, température, etc.) (147).

- Dans l'espace :

* Les teneurs en cuivre (total ou "extractible") peuvent varier beaucoup d'un point à un autre d'une même parcelle, apparemment homogène ; le coefficient de variation dépendant du type de sol allant de 15 à 40 p. 100 (124).

* De même les teneurs peuvent varier considérablement le long d'une même verticale, d'un horizon à l'autre du profil à quelques centimètres de distance (Tableau II).

b - Analyse et interprétation

L'analyse d'un oligoélément dit "total" d'un échantillon de sol ne fournit que la réserve en cet oligoélément mais ne permet pas de conclure quant à la fraction utilisable à court terme par la plante.

L'utilisation d'extractifs chimiques successifs est une méthode d'approche encore imparfaite (147, 51). Par suite, un seuil de carence ne peut être défini, avec tel extractif, que pour une plante donnée, sur le type de sol expérimenté, et en fonction de l'objectif poursuivi (Tableau I).

B - LES REGIONS GEOCHIMIQUES

=====

Si l'analyse en cuivre du sol ne semble pas pouvoir servir au diagnostic de la carence animale, il existe néanmoins certaines données, au niveau des roches-mères et de la pédogénèse, qui permettent de soupçonner la possibilité de carence.

1 - Les roches-mères

Les lois de la géochimie régissent la composition en oligoéléments des différentes roches (90, 141, 145).

a - Les roches éruptives = ignées

Ces roches issues du refroidissement du magma ont des

compositions qui sont le résultat d'un certain nombre de processus. Cela influe sur leur teneur en Cu et Mo.

a.1 - Processus de formation et composition en Cu - Mo

- Groupement des éléments par affinité chimique :

les éléments à forte affinité pour le soufre (tel le cuivre et à un degré moindre le molybdène) entrent dans la constitution des sulfures (minerais) et de certains minéraux complexes accessoires des roches, ou restent indépendants.

- Des possibilités de substitutions isomorphiques dans les édifices cristallins, lors de la constitution des réseaux, peuvent intervenir entre ions de dimensions ioniques voisines (entre Si, Al et Mo). Les oligoéléments métalliques se trouvent ainsi faire partie intégrante du réseau de certains silicates foncés, "les ferromagnésiens".

- Des possibilité de localisation de certains ions hors des réseaux cristallins : ainsi le cuivre et le molybdène, éléments sulfophiles, peuvent entrer dans la composition de minéraux non silicatés, constituants accessoires des roches, localisés entre les cristaux ou inclus dans les minéraux principaux. Ils peuvent aussi être retenus à la surface des réseaux dans les interfaces ces cristaux à structure phyllieuse (cuivre des biotites) ou dans les microfissures des minéraux principaux.

- L'ordre de cristallisation des minéraux et de constitution des roches lors du refroidissement du magma influe ; les silicates subissent une cristallisation fractionnée ; deux séries parallèles de minéraux se constituent progressivement :

* la série calcosodique qui s'appauvrit en calcium au cours du refroidissement, d'où formation de feldspaths de plus en plus acides.

* la série ferromagnésienne (qui correspond aux feldspaths les plus calciques) où se concentrent les oligoéléments.

a.2 - Conséquences sur les teneurs en Cu et Mo

- Les roches riches en cuivre sont celles qui contiennent une forte proportion de ferromagnésiens, c'est-à-dire les roches basiques ou saturées (basaltes, gabbros, diorites).
(19) (Tableau III).

- Les roches pauvres en cuivre et mieux pourvues en molybdène sont les roches acides apparaissant en fin de refroidissement et à forte proportion de silice et de feldspath (granites, rhyolites) (19) (Tableau III).

- Influence du site et de l'âge :

Si la composition moyenne des différentes classes de roches éruptives est bien connue, il existe cependant des nuances sensibles, dans un même type, entre des secteurs géographiques différents ("provinces métallogéniques") et des âges de formation différents. Ainsi les granites du socle hercynien sont plus pauvres en cuivre et molybdène que les granites des Maures et de Corse (145). De même les granites à biotite précambriens de Basse Normandie et Bas Maine sont mieux pourvus en cuivre que les granites hercyniens à taux élevés de muscovite.(42). De plus il existe des nuances survenant au sein d'un même massif comme pour le cuivre dans le massif granitique de Flamanville (Cotentin) (145) (Tableau IV).

b - Les roches sédimentaires

b.1 - Les roches détritiques :

La plupart sont issues de l'érosion des roches éruptives avec transport et triage par l'eau de leurs minéraux d'origine et apparition de produits d'altération nouveaux (hydroxydes, argiles). La répartition des oligoéléments dépend beaucoup des migrations subies au cours des dépôts eux-mêmes (19) mais d'une façon générale les mêmes phénomènes observés à propos des sols se retrouvent ici (147) :

- les argiles concentrent tous les oligoéléments surtout quand elles sont bien drainées, et particulièrement le cuivre,

- les hydroxydes de métaux lourds retiennent le molybdène,

- le molybdène peut reformer des anions solubles complexes,

- le cuivre est facilement lessivé sous forme de sulfate,

TABEAU III : Teneurs en Cu - Mo de quelques roches : Hodgson, Mitchell
Pedro

Roches	Cu (mg/kg)	Mo (mg/kg)
Croûte terrestre (moyenne)	70	2,3
a) Roches éruptives		
Ultrabasiques	20	0,2
Basaltes	87 à 100	1,4
Amphibolites	30 à 50	1
Granodiorites	35	1
Granites à plagioclase	30	1
Granites à Orthose	5 à 10	1,3
b) Roches sédimentaires		
Argilés (moyennes)	57	2
Schistes	45	2,6
Grès quartzeux	1,5 à 5	-
Grès	10	0,2
Marnes infralias	49	15 à 42
Calcaires	4 à 20	0,4

TABLEAU IV : Teneur en Cu de quelques roches françaises

(Pedro 1968 - Dautria 1970)

Roches Françaises	Cu (mg/kg)
Granite d'Andlau (Vosges)	5
Argiles triasiques (Aveyron)	8
Marnes noires liasiques (Aveyron)	49
Granite de Flamanville (Cotentin)	8 à 240
Granites Ouest Massif Armoricain	1 - 14
Granites Est Massif Armoricain	9 - 26
Grès siluriens (Massif Armoricain)	1,5 - 5
Gneiss - micaschistes (Massif Armoricain)	7 à 35
Schistes argileux carbonifères (Massif Armoricain)	10 - 47
Amphibolites (Massif Armoricain)	30 - 150
Granites à biotite n° 1 (Crèuse)	3
Granites à biotite n° 2 (Allier)	8
Granites à biotite n° 3 (Morvan)	6,6
Leucogranite n° 1 (Morvan)	4,2
Leucogranite n° 2 (Morvan)	22,5

Ainsi (Tableau IIIb) :

- sont riches surtout en cuivre les argiles et tous les sédiments fins ferrugineux,

- sont pauvres en cuivre et molybdène les roches siliceuses formées surtout des minéraux résiduels résistant à l'altération (quartz) ou de fragments de roches non altérées donc sans argile (sables, grès et conglomérats). Les dépôts glaciaires formés d'éléments broyés et très lavés sont pauvres (147, 158),

- sont riches en molybdène les argiles neutres ou alcalines mal drainées (marnes).

b.2 - Les dépôts calcaires

Ils sont pauvres dans l'ensemble et on ne trouve dans les calcaires que 10 à 50 p. 100 du taux moyen de la croûte terrestre en Mo et 7 à 30 p. 100 en cuivre. Cependant certains calcaires contiennent des impuretés et on trouve toutes les transitions entre le calcaire proprement dit (pauvre) et les argiles calcaires (relativement riches).

b.3 - Les tourbes oligotrophes, formées sur roches acides sont toujours très pauvres en oligoéléments (196).

c - Les roches métamorphiques

Ces roches d'origine éruptive ou sédimentaire sont recristallisées sous l'influence de la chaleur et de la pression.

- Certaines ne subissent pas de remaniement chimique profond et gardent leur composition d'origine : les schistes cristallins sont assez riches en oligoéléments et les leptynites sont pauvres.

- D'autres, au contraire, subissent des migrations et prennent une constitution très voisine de celle des granites (migmatites, anatexie).

- Enfin certaines subissent un enrichissement par des éléments volatils ce qui modifie profondément leur composition.

Les données concernant ces roches sont des cas particuliers (141) difficilement extrapolables.

d - En résumé

- Les teneurs moyennes en cuivre et molybdène des principales roches sont assez bien connues, avec les écarts susceptibles d'être rencontrés. (Tableau III).

On peut considérer comme (147) :

- * pauvres en cuivre les sables, grès quartzites, conglomérats et la plupart des granites,

- * assez pauvre en cuivre les calcaires non ou peu argileux,

- * riches en cuivre les basaltes, les argiles et les schistes,

- * bien pourvues en molybdène les granites acides, les schistes ardoisiers, les marnes noires infraliasiques et certaines alluvions marines.

- Des prélèvements divers en France ont permis de confirmer ces données générales, en apportant toutefois une nuance importante (Tableau IV) ; certains granites sont beaucoup plus pauvres en cuivre, mais aussi peuvent être, localement, beaucoup plus riches (Cotentin - Massif Central).

Donc, à condition de rester à petite échelle et de façon générale, les données classiques de la géochimie permettent de soupçonner des carences en cuivre.

2 - Les sols (types pédologiques)

a - L'altération de la roche au cours de la pédogénèse a pour conséquence la libération de ses éléments chimiques et leur passage sous différentes formes plus ou moins mobiles. Or la mobilité des constituants auxquels sont liés les oligoéléments (argiles, hydroxydes, complexes, chélates, colloïdes) est sous la dépendance directe des facteurs de la pédogénèse c'est-à-dire (II) :

- la roche elle-même (acide ou calcaire, perméable ou non),

- le climat (pluie, température),

- la topographie et le drainage de la station,
- le type de végétation (acide ou non).

Les éléments solubles et pseudosolubles ou liés aux colloïdes dispersés migrent vers les "horizons d'accumulation". L'ensemble aboutit à la constitution d'un "profil" caractéristique du type d'évolution subie (II).

b - La conséquence de ces mouvements est une redistribution complète des oligoéléments dans le profil. Par rapport à la roche mère altérée (horizon C du profil) on observe, dans les sols en place à horizons bien différenciés les remaniements suivants (II, 19) :

- En conditions bien drainées :

- * un enrichissement relatif des couches superficielles par bioaccumulation, cette accumulation ne correspondant à une richesse réelle que si cette matière organique est bien minéralisable.

- * une accumulation relative dans les horizons illuviaux, enrichis en argile et en hydroxydes de fer. Le cuivre est plus énergiquement retenu par l'argile que le molybdène. Mais il est fortement chélaté et donc facilement éliminé des sols podzoliques. Le molybdène est fortement retenu dans les structures cristallisées du fer mais il est non assimilable (paléosols rubéfiés, sols basaltiques très altérés, cuirasse latéritiques) (147).

- * un appauvrissement des horizons éluviaux. Lorsque l'érosion décape la couche superficielle enrichie, il reste un sol très carencé en éléments totaux.

- En sol mal drainé : la solubilisation des éléments aboutit à un appauvrissement en éléments totaux (69) mais à une assimilation plus élevée surtout pour le molybdène (140).

c - Le degré d'évolution du sol (âge du sol) a une importance capitale. Ainsi sur un basalte à olivine Taylor, Cunningham et Davies (187) trouvent 60 à 120 mg/kg de cuivre

sur les sols jeunes contre 30 à 40 sur les sols vieux. Wells (196) confirme la même gamme (100 contre 25 mg/kg) sur des andésites et des basaltes, et précise que sur roches siliceuses les teneurs s'échelonnent entre 25 et 2 mg/kg selon le degré de lessivage, en relation avec la pluviométrie.

A l'opposé, sur rendzines, où l'altération se traduit par une accumulation de matière organique en surface les teneurs sont de 20 mg/kg en sol jeune contre 80 mg/kg en sol vieux (196).

Le molybdène suit les mêmes variations.

d - En résumé :

Si la teneur moyenne en cuivre total (et molybdène) est surtout lié au type de roche mère, sa distribution dans le profil est directement liée (147) :

- à la localisation des oligoéléments dans la roche elle-même,

- au type de pédogénèse,
- au degré d'évolution de ce type.

Dans l'ensemble un sol jeune garde les caractéristiques de la roche d'origine ; les sols très évolués tendent à s'uniformiser et à devenir, finalement tous très pauvres en tous les oligoéléments vis à vis du végétal. Plus le sol est âgé, plus les rapports entre la roche-mère et le sol deviennent lâches (141).

C - AIRES DE CARENCE EN CUIVRE

=====

L'apparition de carences, liées le plus souvent aux faibles teneurs des foins de prairies naturelles, est subordonné (141) :

- à la réserve en oligoéléments totaux de la roche mère, c'est-à-dire au type de roche,

- au type et au degré d'altération subie par cette roche au cours de la pédogénèse,

- aux interventions naturelles (pluie, température) et humaines (amendements, engrais) qui modifient profondément le pH et le potentiel redox.

Il existe donc "des aires géographiques de carence", qui correspondent à des sites géographiques variés dans le monde, mais qui se rattachent à une liste de "types de sol" assez bien définie. Le comportement du cuivre et du Cobalt, dépendant presque exclusivement de la géochimie et de la pédologie, il a été possible d'appliquer les lois générales aux conditions françaises et d'établir ainsi, à petite échelle, une carte prévisionnelle des carences possibles pour ces 2 oligoéléments (146, 147).

1 - Les types de sols carencés

En comparant les localisations géographiques de carences connues, animales ou végétales (III, XI, XIV) et les sols de ces régions, on peut situer les différentes carences en cuivre selon les types de sols comme suit (19, 146) :

a - Les carences primaires en cuivre correspondent :

- le plus souvent à des podzols et sols podzoliques (41, 196), tous sols acides de texture légère formés sur matériau détritique quartzeux (sables et grès) ou issus de roches acides (leucogranites, cendres rhyolitiques).

Cependant certains sols podzoliques sur primaire ou jurassique ne sont pas carencés lorsque l'horizon d'accumulation argileuse est à faible profondeur et contribue vraisemblablement à l'alimentation des racines (129).

Les diluviums glaciaires grossiers sont particulièrement carencés (169) mais les sols glaciaires lorsqu'ils sont argileux et sains ne le sont pas.

Les terres de bruyère, les sols des landes très riches en matière organique difficilement minéralisable, sont très déficients dans les années qui suivent leur mise en valeur (169).

- souvent à des sols très lessivés sur roches basiques profondément altérées : basaltes anciens et surtout cendres volcaniques sous pluviométrie élevée (196, 3).

- aux tourbières acides (196),

- à certains sols calcaires issus des schistes carbonifères, du Trias et du Crétacé, ainsi que les dunes coquillières de sable coquillier (196).

* Cette carence primaire en cuivre va souvent de pair avec la carence en cobalt, ces deux ions ayant un comportement géochimique voisin (19).

b - Les carences secondaires dues à un excès de molybdène se situent :

- de façon générale, sur les sols mal drainés :

* sols neutres ou alcalins, notamment les marnes de l'Infralias et les argiles à blocs plus ou moins décalcariées, dérivées du Crétacé (1).

* sols des plaines d'alluvions granitiques récentes dont les matériaux peu altérés sont encore riches en molybdène et qui sont facilement inondables (105).

* sols tourbeux de prairie et gleys humiques très acides surtout lorsqu'ils sont dérivés de dépôts marins (143) ainsi que la plupart des tourbières (105).

- de façon plus épisodique, sur quelques sols sains :

* certaines rendzines ou sols rendzéniformes (187, 105).

* les coulées basaltiques jeunes et les cendres très récentes.

Les types de sols énumérés plus haut correspondent à des carences effectivement observées, mais la généralisation de ces données aux régions encore non étudiées ne peut se faire qu'avec beaucoup de prudence, surtout en ce qui concerne les sols sédimentaires et les sols basaltiques.

Ainsi certains sols jeunes issus de basaltes récents et d'andésites (196), de certains schistes primaires et surtout des amphibolites (42) se sont révélés non carencés en cuivre après étude détaillée.

Il en est de même pour les tchernoziem argileux assez profonds dans la mesure où le cuivre n'est pas bloqué par la matière organique.

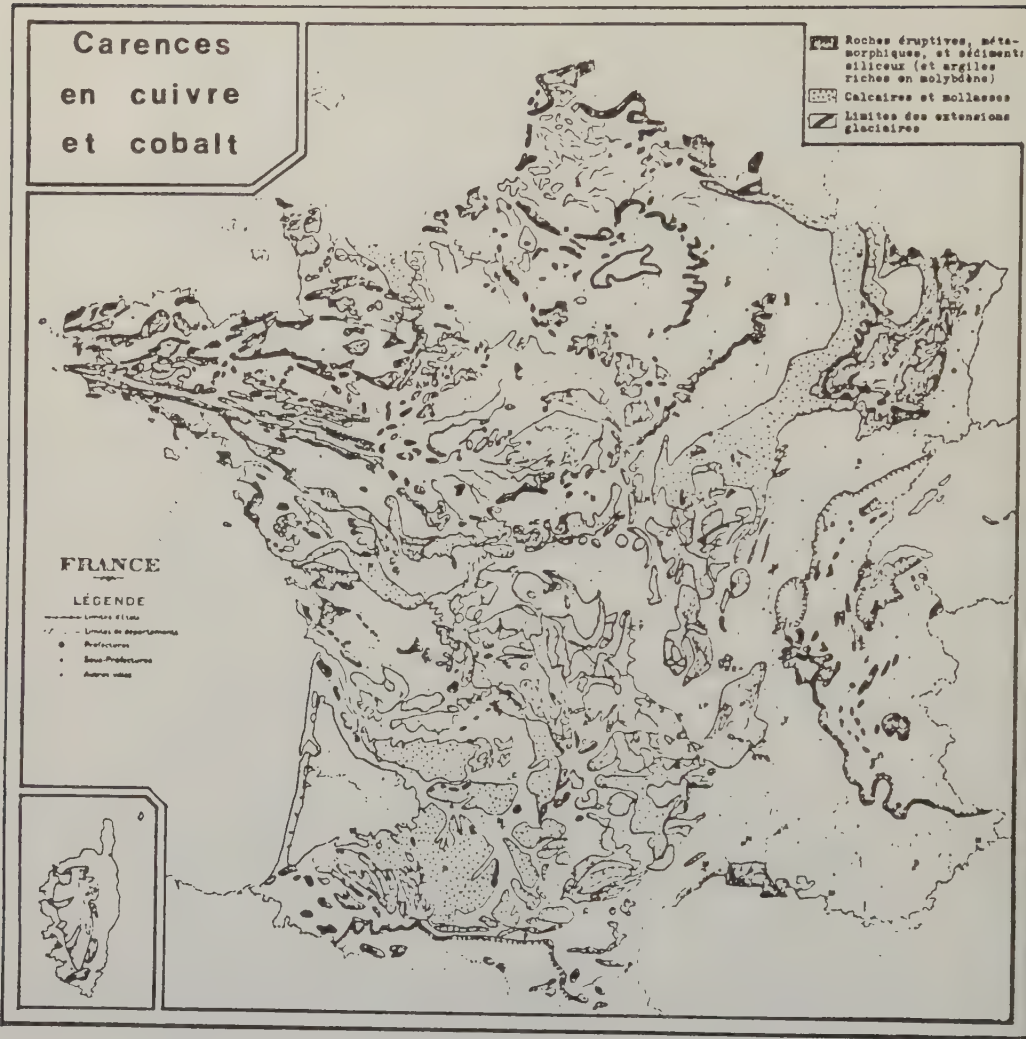


Figure 2 : Carte des sols pauvres en Cuivre et Cobalt en France.

2 - Les aires de carence primaire en cuivre et cobalt en France

Les études menées par l'INRA, basées sur la géochimie, la pédologie et la pédochimie, et la bibliographie étrangère, ont aboutit à la constitution d'une carte des carences potentielles en cuivre et cobalt en France (147) (Figure 2). Ce document permet de visualiser le problème de la régionalisation des carences, et constitue un outil supplémentaire dans le diagnostic de la carence en cuivre (si délicat à poser) pour le vétérinaire.

Ces carences peuvent se situer en France dans de multiples conditions (19, 146, 147) :

a - Sur des roches éruptives acides du type granite ou rhyolite, roches pauvres en cuivre (1 à 20 ppm Cu total).

- Massif Armoricaïn jusqu'à la Vendée et la Haute Normandie,

- Massif Central (Marche, Millevaches, Combrailles, Margeride, Madeleine, Livradois, Forez, Lyonnais, Morvan, Rouergue, Segala et Montagne Noire),

- Vosges (partie Sud-Est),

- Alpes (Pelvoux, Mercantour),

- Maures et Esterel à un degré moindre.

L'intensité de la carence est fonction de deux facteurs :

- la composition de la roche : ainsi les granites précambriens de Basse Normandie ne sont pas carencés (42), le plateau de Millevaches est vraisemblablement plus carencé que la plus grande partie du Forez (146)

- l'intensité du lessivage, maximum à l'intérieur des terres dans le Finistère ou aux altitudes les plus élevées du Massif Central. Ces granites ont donné naissance à des sols lessivés le plus souvent (pluviométrie supérieure à 900 mm en dehors des fortes pentes), parfois à des podzols ou des sols podzoliques.

b - Sur des roches volcaniques basiques altérées

- Soit des cendres volcaniques, particulièrement altérables (145).

- Soit des sols basaltiques très anciens sous altitude élevée, relief peu accusé et pluviométrie supérieure à 1 000 mm : monts Dore, monts Domes, Cézallier, Aubrac peut être (146).

c - Sur des sédiments détritiques acides

qui ont donné naissance à des podzols, des sols podsoliques ou des sols très lessivés. Ce sont les grès et les sables quartzeux (pauvres) ou ferrugineux (Cu bloqué) (145).

c.1 - Sédiments primaires :

- grès quartzeux du Cambrien, silurien, dévonien en Bretagne, en Normandie, dans le Sud du Massif-Central (Montagne Noire) dans les Ardennes.

- grès rouges permien du Bassin de Brive, du Ségala, du Camarès (Aveyron).

c.2 - Sédiments secondaires :

- grès bigarrés du Trias dans les Vosges (les homologues de la Forêt Noire sont très carencés (10)). Les affleurements du Morvan, des Alpes et des Pyrénées sont probablement carencés.

- Sables ferrugineux du Cenomancien (Crétacé) aux confins du Perche et du Maine, du Berry et de la Touraine.

c.3 - Sédiments tertiaires :

- éocènes : sables du Soissonnais, dépôts sidérolithiques de la bordure ouest et nord-ouest du Massif Central (Périgord, Poitou, Montmorillonnais, Bourbonnais et Brenne), sables de Cuise du Bassin Parisien ;

- oligocènes : sables de Fontainebleau

- miocènes : sables de Sologne et de l'Orléanais

- mioplicènes : sables de Sologne Bourbonnaise, sables fauves de la Chalosse.

c.4 - Sédiments quaternaires :

- sables des Landes ayant donné naissance à des podzols.

d - Sur des sédiments calcaires

La loi de répartition des oligoéléments dans les sédiments calcaires est moins simple que dans les roches éruptives. Des études locales sont nécessaires pour confirmer leur comportement, dans l'ensemble les sols carencés sont les rendzines, les sols humides carbonatés et les sols rouges méditerranéens (146).

- Par comparaison avec les références étrangères signalant effectivement des carences, on peut considérer comme carencés en Cu - Co et Mn les calcaires suivants (147) :

* calcaires coquilliers du Muschelkalk (Trias des Vosges) (10),

* calcaires de l'Infralias, du Lias et les premiers étages du Jurassique moyen ; craie du Crétacé,

* molasses (calcaires gréseux tertiaires du Sud Ouest).

- Autrement dit les carences sont possibles dans les Causses, le Périgord et le Quercy, les Champagnes (Est, Bassin Parisien, Bourgogne, Berry, Charentes), sur les faluns d'Anjou et de Touraine, dans le Jura et les Alpes calcaires en altitude, peut être dans la vallée du Rhône (Crau) et le Languedoc (sols rouges).

e - Sur des sédiments détritiques calcaires plus ou moins décarbonatés

- Les cônes d'alluvions fluvioglaciaires des Pyrénées (Chalosse, Lannemezan), du Jura et des Alpes (Dombes, Bas Dauphiné),

- Les argiles à silex issues du Crétacé supérieur que l'on rencontre notamment en Normandie, dans le Nord du Berry, dans le Bassin Parisien.

3 - Les aires de carences en cuivre induites par un excès de molybdène

a - La géochimie du molybdène

présente quelques particularités importantes à

signaler :

- Les formes mobiles sont représentées par les ions (MoO_4^{--} , MoO_3^-), les complexes minéraux et les chélates organiques. Les formes assez mobiles par les formes adsorbées à la surface des colloïdes, et par les formes hydroxyliées.

- Le molybdène se comporte comme un anion, il est surtout attiré par les gels d'hydroxydes de métaux lourds, mobile aux pH alcalins et très soluble dans les milieux réducteurs (anaérobie) (80).

- Cet oligoélément est présent en quantité relativement importante dans les roches à forte proportion de silice et de feldspath (granites acides, rhyolites), dans les schistes ardoisiers, les marnes noires infraliasiques et certaines alluvions marines (19, 147).

- Les excès de molybdène peuvent donc se rencontrer :

* soit sur des sols formés sur roches riches en molybdène,

* soit sur des sols moins bien pourvus mais dont les conditions de pH et de potentiel redox sont favorables à la mobilisation de cet élément.

b - En France de telles conditions sont réunies :

(146) - Sur des sédiments récents riches en

- Sur les sols issus de roches riches en molybdène :

tels les schistes carbonifères du Morvan, du Bassin de Roanne,

- Sur des sols récents issus de roches assez riches en molybdène tels les cônes d'alluvions granitiques récentes des vallées des Alpes, des Pyrénées Orientales, des Vosges.

- Sur les sols hydromorphes neutres ou légèrement calcaires :

* les marnes infraliasiques de l'aurole du Bassin

Parisien depuis les Ardennes, la Lorraine, par le Morvan et jusqu'au Poitou et quelques affleurements en Normandie et dans certaines vallées des Alpes (Isère, Drac, Ubaye),

* les sols d'origine glaciaire, tels ceux de la Bresse, la Chalosse, le Lannemezan.

- Sur certains sols hydromorphes acides (à l'exception probable des anciens pseudogleys) tels certains sols de Brenne, de Sologne Bourbonnaise, de la vallée de la Saône et du Doubs, des sols tourbeux de l'Aisne, de l'Oise et des tourbières hautes du Massif Central.

- Enfin sur les sédiments marins récents, les sols noirs des marais, où, au mauvais drainage et à l'alcalinité se superpose souvent la présence de sulfates : les marais poitevin, breton, du Cotentin, la côte maritime de Flandres et de Picardie, la Camargue.

4 - Valeur et limites de la cartographie des carences en cuivre

a - Valeur

Les résultats de deux enquêtes réalisées, l'une auprès des vétérinaires (120), l'autre auprès des éleveurs (153) viennent confirmer l'existence des carences en cuivre sur certaines roches (Tableau V) et rejoignent les indications fournies par la carte des carences potentielles établie d'après les données géopédochimiques.

L'analyse des réponses fournies permet de soupçonner l'existence de carence en cuivre quasi-généralisée en France.

b - Les limites

La carte des carences potentielles en Cu (et Co) en France n'est utilisable qu'à une petite échelle, à cause des fortes variations locales (roches éruptives, roches sédimentaires).

La diversité des roches complique le problème et au voisinage des limites les sols sont en réalité des mélanges.

De plus l'absence de référence géochimique valable sur certaines aires (zones en blanc sur la carte) ne doit pas être assimilée à une absence de carence.

Certains sols ont une évolution locale qui n'est pas celle prévue à partir de la roche-mère sous jacente (cas des revêtements superficiels peu épais non mentionnés sur les cartes géologiques).

Tous ces éléments font que les aires géographiques retenues sont à considérer simplement comme des régions susceptibles d'extérioriser davantage la carence qu'ailleurs. A l'intérieur de certaines aires de carence, la carence n'est pas égale en intensité et même à la limite n'existe pas dans certaines "stations". A l'opposé certaines zones non retenues peuvent s'avérer carencées après étude détaillée.

Conclusion

L'étude du cuivre au niveau du sol, bien qu'incomplète encore, nous laisse supposer une vaste étendue en France des subcarences, dans les conditions naturelles.

La "régionalisation" correspond simplement à une plus ou moins grande densité.

Mais des modifications importantes sont à attendre à la suite des interventions humaines réalisant les facteurs d'intensification. C'est pourquoi la liaison sol-animal devient de plus en plus lâche au fur et à mesure que l'intensification s'accroît. Par suite une étude sur les aliments distribués et surtout les fourrages devient impérative.

De plus l'absence de régence géochimique valable sur certaines aires (zones en blanc sur la carte) ne doit pas être assimilée à une absence de carence.

Certains sols ont une évolution locale qui n'est pas celle prévue à partir de la roche-mère sous jacente (cas des revêtements superficiels peu épais non mentionnés sur les cartes géologiques).

Tous ces éléments font que les aires géographiques retenues sont à considérer simplement comme des régions susceptibles d'explorer davantage la carence d'un élément. A l'intérieur de certaines aires de carence, la carence n'est pas égale en intensité et même à la limite n'existe pas dans certaines "stations". A l'opposé certaines zones non retenues peuvent s'avérer carencées après étude détaillée.

Conclusion

L'étude du cuivre au niveau du sol, bien qu'incomplète encore, nous laisse supposer une vaste étendue en France des subcances, dans les conditions naturelles.

La "régionalisation" correspond simplement à une

plus ou moins grande densité.

Mais des modifications importantes sont à attendre à la suite des interventions humaines réalisant les facteurs d'intensification. C'est pourquoi la liaison sol-animal devient de plus en plus lâche au fur et à mesure que l'intensification s'accroît. Par suite une étude sur les éléments distribués et surtout les fourrages devient impérative.

II - LE CUIVRE DANS LES ALIMENTS

Dans la très grande majorité des cas, la ration alimentaire de base des ruminants est constituée par des plantes fourragères distribuées sous différentes formes : pâturage d'herbe, foins (et pailles), ensilages divers. C'est au niveau de cette ration de base que se dessinent les carences en oligoéléments, carences non compensées par l'apport d'un complément minéral enrichi en fer, cuivre, cobalt, zinc Or de très nombreux facteurs sont susceptibles de faire varier les taux de minéraux dans les plantes et ainsi d'agir sur les carences animales, en particulier tous les facteurs d'intensification fourragère conditionnant en partie le niveau des performances zootechniques. L'étude de la composition des fourrages par rapport à celle de la ration alimentaire couvrant normalement les besoins du ruminant est donc d'une importance capitale.

Nous donnerons aussi quelques taux de cuivre rencontrés dans les aliments complémentaires.

Enfin nous envisagerons le cas des animaux en régime lacté.

A - LE CUIVRE DANS LES FOURRAGES

=====

1 - Rôle du cuivre dans la plante

a - Rôle

Le cuivre entre dans la composition d'enzymes qui agissent dans des processus d'oxydation (polyphénol oxydase, acide ascorbique oxydase).

Il fait aussi partie intégrante de certaines protéines intervenant dans la synthèse de la chlorophylle et peut être dans la photosynthèse elle-même.

Il joue un rôle important dans le métabolisme azoté des racines (réduction des nitrates) et dans la résistance de la plante à la sécheresse

Le cuivre est nécessaire aux bactéries des légumineuses pour la fixation de l'azote de l'air.

b - Les symptômes de carence

b.1 - Description - Plantes atteintes

Les symptômes de carence se traduisent par une chlorose des parties jeunes et une réduction de la croissance générale (19).

Toutes les plantes n'ont pas la même sensibilité :

- les plus sensibles sont les céréales (sauf le seigle et le riz) : leurs extrémités poussent en prenant une teinte sale, puis se nécrosent ; c'est la maladie des "bouts blancs" décrites par Coppenet et Calvez (41) en Bretagne.

- les légumineuses sont moins sensibles (trèfle, luzerne, pois) elles montrent le même pâlissement et une courbure du pétiole terminal ; cependant les trèfles violets disparaissent sans autre signe que la petite taille des folioles (41).

- les graminées fourragères sont rarement atteintes : quelques blanchiments des extrémités apparaissent dans les cas aigus, à la sortie des inflorescences (158).

b.2 - Seuil de carence

Le symptôme apparaît lorsque la concentration de la plante tombe en dessous d'un certain seuil, variable avec l'espèce (bagage génétique) et les autres ions en présence (phénomènes d'antagonisme et de synergie).

Le seuil de carence pour la plante, c'est-à-dire la teneur en dessous de laquelle sa croissance ralentit, est souvent très inférieur à celui de l'animal : c'est le cas pour le cuivre (147). Il se situe vers 2 à 4 ppm de cuivre par rapport à la matière sèche (XV).

Les graminées ont des seuils particulièrement bas ; les légumineuses ont des seuils plus élevés et leur rendement est peu affecté pour des teneurs inférieures à la limite reconnue nécessaire aux animaux (98).

Par conséquent les signes de carence en cuivre sur les végétaux ne fournissent un élément du diagnostic de carence animale que dans quelques rares cas aigus.

c - Les symptômes de toxicité

L'excès de cuivre provoque des symptômes voisins de ceux de la chlorose ferrique : tige rougeâtre, feuilles décolorées et petites mais surtout une réduction importante du système racinaire avec diminution de sa perméabilité, d'où la baisse considérable de rendement (52).

Cependant les cas de toxicité sont exceptionnels ; le seuil est situé au-dessus de 20 ppm de cuivre (XV) pour les fourrages, mais certaines plantes (caryophyllacées, mousses) en accumulent jusqu'à 500 ppm sans en souffrir.

La toxicité molybdique est inconnue sur les végétaux.

Ainsi des teneurs "normales" pour la plante en cuivre, molybdène peuvent se révéler "toxiques" pour l'animal (147).

2 - Teneurs en cuivre (et molybdène)

Une enquête réalisée sur les fourrages nous donne les différentes valeurs relevées en France sur plusieurs types de prairies (20) (Tableau VI).

Les conclusions de ce travail sont particulièrement intéressantes :

- la presque totalité des foins analysés sont insuffisamment pourvus en cuivre : 45 p 100 en contiennent moins de 5 mg/kg MS, et 94 p 100 moins de 7 mg/kg MS. Le minimum se situe à 2,8 le maximum à 8,9 et la moyenne à 5,2. Le remplacement des foins de prairies naturelles par d'autres foins ou par des ensilages de maïs plante entière ne modifie pas sensiblement la situation. Les ensilages d'épis de maïs

TABEAU VI : Teneurs Moyennes en Cuivre des Prairies en France (1969 - 70 - 71)

Bellanger, Périgaud, Lamand 1973

	Nombre échantillon	Cu mg/kg MS	σ_m
I - Prairies Naturelles			
- foins de 1ère coupe (déprimées)	93	5,31	0,12
(non déprimées	109	5,12	0,11
(toutes confondues	454	5,20	0,05
- foins de 1ère coupe	77	5,17	0,11
2ème coupe (mêmes régions)	22	7,84**	0,34
- foins de 1ère coupe	116	5,27	0,10
Regains (mêmes régions)	26	7,55**	0,31
- Herbe paturée	19	7,49	0,59
foins (mêmes régions)	40	5,04**	0,12
II - Graminées			
(déprimées	7	5,28	0,39
Foins Ray Grass Italie (non déprimées	7	4,32	0,49
1ère coupe (toutes condondues	23	4,93	0,27
Foins prairies nat. 1° coupe (mêmes régions)	55	5,18	0,15
Foins autres graminées 1ère coupe	17	4,88	0,29
Ensilage Ray Grass d'Italie	6	6,70	0,53
foins (mêmes régions)	120	5,20**	0,10
Ensilage maïs	32	6,09	0,29
III - Foins de Légumineuses			
Luzerne 1ère coupe	11	6,47	0,34
Prairies naturelles (mêmes régions)	39	4,91**	0,15
(1ère coupe	23	7,06	0,31
Luzerne (2ème coupe	19	7,48	0,29
Trèfle violet 1ère coupe	7	6,65	0,53
Prairies naturelles (mêmes régions)	55	5,18**	0,15
IV - Foins de Temporaires			
1) A base de luzerne (1ère coupe)	35	5,99	0,31
Prairies naturelles (mêmes régions)	61	5,27	0,13
1ère coupe de temporaires	9	5,23	0,32
2ème coupe (mêmes régions)	5	6,50*	0,21
2) A base de trèfle violet (1ère coupe)	15	4,24	0,29
Prairie naturelle (mêmes régions)	52	5,09*	0,14
1ère coupe de temporaires	10	5,23	0,35
2ème coupe (mêmes régions)	8	7,68**	1,05
3) Complexes (1ère coupe)	58	5,52	0,20
Prairies naturelles (mêmes régions)	83	5,14	0,11
1ère coupe de temporaires	134	5,33	0,12
2ème coupe (mêmes régions)	16	6,35*	0,54

* différence significative à $P < 0,05$)

** " " $P < 0,01$) avec le chiffre précédent de la même colonne

sont beaucoup plus carencés. Les ensilages de ray grass d'Italie, bien que significativement plus riches que les foins des mêmes régions, restent en dessous du seuil de 7 mg Cu/kg MS. Par conséquent des carences ou des subcarences sont à attendre un peu partout en France .

- contrairement aux U.S.A. et aux pays du Nord de l'Europe (Irlande, Angleterre), les toxicités cuivriques primaires ne semblent pas à craindre.

- la même enquête nous révèle des taux de molybdène moyens de :

* $0,63 \pm 0,04$ mg/kg MS dans les prairies naturelles en première coupe,

* $0,74 \pm 0,08$ mg/kg MS dans les prairies temporaires complexes,

* $1,18 \pm 0,33$ mg/kg MS dans les regains,

* 0,33 mg/kg MS pour les trèfles violets purs,

* 0,39 mg/kg MS pour les cultures pures de luzerne

- des teneurs particulièrement basses ($< 0,1$ mg/kg MS) se rencontrent en Dordogne, dans le Lot et Garonne, l'Indre et La Marne.

- à l'opposé, des foins riches ayant plus de 3 mg Mo/kg MS se rencontrent exceptionnellement dans les Ardennes, la Haute Saône, sur des sols bruns calcaires hydromorphes et des sols rendziniformes humides issus du jurassique inférieur et moyen.

Les fourrages, base de l'alimentation traditionnelle, posent donc un réel problème car ils sont particulièrement susceptibles d'être pauvres en cuivre. Si les teneurs moyennes relevées ne permettent pas d'envisager des carences aiguës sur l'animal, de nombreux facteurs peuvent faire osciller les valeurs de part et d'autre du seuil admis (20) (Tableau VI). Ces différents facteurs sont liés à la plante (génotype, cycle...) aux conditions du milieu (sol, climat, année) (98,99) et aux techniques culturales (mode de récolte, amendement, fertilisants) (148). Nous allons étudier l'influence de ces nombreux facteurs en gardant bien en vue les effets possibles sur le ruminant.

Tableau VII : Teneur en Cu et Mo (ppm/MS) des 3 familles de plantes prairiales

F. de Montard et S. Périgaud 1975

- Périgaud 1971)

	Lieu de l'Expérimentation	Graminées	Légumineuses	Diverses
Cuivre	ITCF Cantal 1969	7,5*	<u>10,1</u>	8,8
	(moyenne sur 2 coupes)			
	ITCF Savoie 1969	7,2	6,7	7,9
	(moyenne 4 coupes)			
	SNST Cantal 1969	5,5*	7,9	7,6
	INRA Alsace 1966 - 1967			
	(moyenne sur 2 coupes)			
	Bernwillier	6,2**	7,0**	<u>9,0</u>
	Hochstatt	7,0*	-	<u>8,3</u>
	IllhaÜsern	7,7	13,8	11,8
	IllhaÜsern (Arène	7,3	8,9	9,5
	Alluvions	6,8	-	8,5
	Lapoutroie	7,3		12,9
	Mittlach	8,9		9,9
	St Gilles	10,3	11,3	9,2
Molybdène	INRA Theix St Genès Champanelle	4,8	6,7	9,1
	ITCF Haute Marne, Balesme	4,2	6,2	10,8
	ITCF Savoie Sainte Reine	4,4*	3,2	<u>6,4</u>
	ITCF Savoie 1969	0,89	0,43	0,37
	INRA Alsace			
	Hochstatt (Regain)	2,58	-	0,46
	IllhaÜsernfoin	1,11	-	0,35
	regain	2,79	-	0,81
	Luttenbach arène (regain)	1,78	0,37	0,81
	Luttenbach alluvions (regain)	1,67	0,36	0,74

(* différence significative au seuil P = 0,05

(** différence hautement significative au seuil P = 0,01

- l'astérisque placé entre deux lignes ou entre deux colonnes concerne la différence entre 2 lignes ou 2 colonnes.

- l'estérisque placé immédiatement sur la ligne après un chiffre indique une différence significative entre ce chiffre et celui souligné sur la même ligne ou sur la même colonne.

3 - Influence des facteurs liés à la plante

a - Le potentiel génétique

a.1 - Familles

Il existe de grandes différences de composition entre les familles fourragères à l'intérieur d'une même prairie (147). Ainsi pour le cuivre les graminées sont plus pauvres que les plantes diverses (pissenlits, plantain) le plus souvent, et les légumineuses se situent en position intermédiaire (Tableau VII) (98, 68). Les résultats de l'enquête sur les foin en France (20) (Tableau VI) confirment le classement : les foin de légumineuses en première coupe (luzerne et trèfle violet) sont significativement plus riches que les foin de prairies naturelles dans les mêmes régions. Toutefois la sensibilité plus grande des légumineuses à la carence en cuivre, fait qu'en milieu très pauvre la loi précédente est inversée (140) ; c'est le cas en France dans la Seine Maritime où la luzerne est plus pauvre que la prairie naturelle (20).

D'autre part, la gamme de variation des teneurs dans un site donné est plus large pour les légumineuses que pour les graminées (de 1,7 à 12 ppm en Ecosse) (140).

Pour le molybdène les graminées sont de deux à cinq fois plus riches que les plantes diverses (Tableau VII) (142).

La composition floristique d'une prairie donne donc une indication de sa composition chimique probable, compte tenu du type de sol (147). C'est ainsi que les foin de prairies temporaires, lorsque celles-ci contiennent au moins 20 p 100 de légumineuses, sont un peu plus riches que les foin de prairies naturelles, quoique moins que les foin de luzerne (146). De plus, l'observation du comportement des plantes qui sont le mieux sensibles à la carence (avoine pour le cuivre) (38) constitue déjà un premier élément de diagnostic de la carence possible.

a.2 - Espèces - Association d'espèces :

a.2.1. - Les différentes espèces d'une même famille peuvent aussi avoir des compositions différentes.

Tableau VIII : Teneurs Spécifiques en Cu (ppm/MS) selon le stade (Mont Dore)

F. de Montard et S. Périgaud 1975

Esèce	Pâtûre	Foin	Regain
Pissenlit	—	12,0	16,8
Knautie des champs	10,9	4,2	8,7
Géranium sylvestre	11,3	6,4	10,4
Grande Berce	6,9	—	10,0
Anthrisque sylvestre	7,6	—	11,2
Trèfle blanc	6,2	3,9	6,4
Dactyle	7,2	4,2	8,2
Trisetite	5,9	3,2	6,4
Fétuque rouge	6,8	5,5	7,8
Agrostide	7,7	5,8	5,0
Avoine pubescente	5,2	4,3	5,8
Paturin des près	6,1	4,5	—

- Dans le tableau VIII la composition en cuivre des différentes plantes constituant une même prairie est précisée à trois stades d'exploitation ; le classement fait apparaître le pissenlit en tête, puis le groupe Knautie, Géranium, grande Berce et Anthriscue, puis les graminées.

Les espèces sélectionnées à haut rendement ont fait l'objet des principales préoccupations à l'INRA (Tableau IX). Parmi les graminées, la fléole et la fétuque élevée -deux espèces qui s'adaptent bien aux conditions difficiles (froid, humidité)- sont particulièrement pauvres en cuivre ; le ray grass est moyennement pourvu ; le paturin, le brome et le dactyle sont les plus riches (147, 152). Parmi les légumineuses les luzernes sont plus riches en cuivre que les trèfles violets.

- En ce qui concerne le molybdène la flore spécifique des prairies humides (Houlque laineuse, agrostis, cretelle des prés) est très riche (67) ce qui aggrave sur l'animal la carence en cuivre due précisément à la faible teneur en cet élément des graminées résistantes à l'hydromorphie. La fétuque élevée, le dactyle et les ray grass anglais tardifs sont également bien pourvus (Tableau X). Sur sol riche en molybdène assimilable (cas rarissime en France) les légumineuses ont des possibilités d'accumulation très supérieures aux graminées (jusqu'à 200 ppm contre 20 ppm) (66, 67).

a.2.2. - L'association de plusieurs espèces sur la composition de chacune d'elles a un effet certain (67), bien qu'assez mal connu. Il est indéniable que les différentes espèces, ou catégories d'espèces, n'ont pas la même aptitude à l'absorption de tel ou tel oligoélément, en particulier les graminées sont en général nettement plus pauvres en cuivre et nettement plus riches en molybdène que les autres plantes (142). Mais on ne peut envisager la prairie comme une simple juxtaposition de plantes, indépendantes les unes des autres ; il y a au contraire une forte compétition dans l'absorption des éléments assimilables du sol, de telle sorte qu'à tout change-

Tableau IX : Teneur en Cu de différentes espèces prairiales (1ère coupe)

S. Périgaud 1971

- Périgaud et Coppenet 1975

Lieu et année d'expérimentation	Plante	Cu ppm/MS
Indre :	Fétuque élevée S 170	5,7
Lvant 1969 INRA	Dactyle floréal	7,8
	Fétuque des près séquana	6,9
Corrèze :	Fétuque élevée S 170	2,2
Feyt 1968 INRA	Ray grass anglais Mellepâtur	2,8
	Fléole pécora	2,0
	Dactyle prairial	4,0
	Fétuque des près Séquana	3,4
	Ray grass d'Italie Rita	3,4
Vienne :	Fétuque élevée S 170	2,0
Lusignan 1969 INRA	Fléole pécora	3,7
	Dactyle floréal	5,7
	Fétuque des près Séquana	2,7
	Ray grass anglais primevère	2,7
	Ray grass d'Italie Tetrone	1,7
Ill et Vilaine :	Trèfle violet Kuhn	6,9
Rennes 1971 INRA	Luzerne Europe	10,0

Tableau X : Teneur en Mo de différentes graminées :

cycle fin Août Lusignan 1968
S. Périgaud et M. Coppenet 1975

:	Espèce	:	Mo ppm MS	:
:		:		:
:		:		:
:	Ray grass Anglais Westerwold	:	0,82	:
:	Fléole mëlusine	:	0,44	:
:	Fétuque élevée S 170	:	3,16	:
:	Dactyle floréal	:	6,40	:
:	Ray grass Anglais Melle pâture	:	7,38	:
:		:		:

Tableau XI : Variation du taux de Cu dans quelques espèces fourragères
suivant les variétés (1ère coupe - fauche)

Périgaud S. 1971 - Périgaud et Coppenet 1975
Périgaud S. et Bellanger 1972

Espèce	Lieu et année	Extrêmes entre variétés :	
		Cu ppm MS	
Luzerne	Montfavet 1969	6,5	9,4
Fétuque élevée	Lusignan 1968	5,6	2,9
Dactyle	Vaudes 1970	4,8	6,2
Fléole	Lusignan 1969	3,0	3,7
Fétuque élevée	Feyt 1969	2,2	2,6

ment de la composition botanique ne correspond pas obligatoirement un changement significatif de la teneur du fourrage global. Des exemples assez nets nous sont fournis par les essais de fertilisation azotée (Tableau XXXV) ; des variations considérables de la composition botanique en faveur des graminées s'opèrent sous l'effet des fertilisations azotées croissantes, alors que les teneurs en cuivre et molybdène ne subissent que de faibles variations. De même, les résultats de l'enquête sur les fourrages en France (20) (Tableau VI) nous montrent que, légumineuses pures mises à part, la composition botanique des foins de lère coupe n'a pas de conséquence appréciable sur la composition en oligo-éléments. Cette conclusion, en contradiction apparente avec les données obtenues sur cultures pures (147) s'explique cependant par le fait que la gamme de variation des teneurs des graminées est relativement étroite au stade foin, et qu'au niveau d'une enquête sur des fourrages riches en graminées, récoltés souvent tardivement les variations individuelles sont tamponnées.

Par suite les lois de variation relatives aux espèces pures ne sont applicables aux prairies complexes qu'avec une plus faible occurrence ; de plus ceci montre que les changements de végétation s'ils ont une action sur la teneur du fourrage récolté, ne sont pas forcément le facteur le plus actif (142).

a.3 - Variétés :

Les différences observées sur une même espèce provenant d'un lieu déterminé sont en partie imputables à la variété (152) (Tableau XI) : les taux de cuivre peuvent en un même lieu passer de 1 à 1,5, voire 2 suivant les variétés.

Mais on n'observe pas toujours le même classement dans tous les sites, ni tous les ans et ce facteur de spécificité variétale n'est pas le plus important (152).

b - Partie de la plante

Toutes les concentrations précédemment relevées sont des moyennes de plantes entières.

- En fait, les feuilles et les épillets sont plus riches que les tiges, et les feuilles supérieures contiennent plus de cuivre et de molybdène que celles de la base. Par exemple un ray grass d'Italie contient 4,3 ppm Cu et 0,4 ppm Mo dans ses feuilles contre 1,8 et 0,1 dans les tiges (68). Les feuilles de luzerne contiennent quatre fois plus de molybdène que les tiges.

- En général les parties jeunes (des feuilles et des tiges) sont mieux pourvues que les parties âgées. Cependant si les éléments disponibles du sol sont insuffisants, la translocation des oligoéléments des vieilles feuilles vers les jeunes est alors très faible et l'inverse peut être observé (146) (d'où apparition des premiers symptômes sur les feuilles jeunes).

Ainsi en sol normal, la paille des céréales est assez pauvre en cuivre 4 - 5 mg/kg et les grains plus riches 6 - 7 mg/kg. En sol carencé la paille reste plus riche que le grain (6,2 à 7,2 mg/kg contre 1,3 à 2,4 mg/kg) et il faut une carence très aiguë (tourbe) pour que la teneur de la paille elle-même descende à 1,2 - 1,9 mg/kg (158).

Cette variation des teneurs entre les différentes parties d'une même plante a pour conséquence pratique l'influence du mode de récolte et de conservation sur la composition globale d'un fourrage (19).

c - Stade végétatif, Stade de récolte

c.1 - Effet sur le cuivre

Les graminées subissent une baisse importante de leur teneur en cuivre au cours de leur premier cycle ; la baisse est d'abord rapide, par exemple : de 10,0 à 5,7 ppm entre le 22 avril et le 5 Juillet sur le dactyle, de 44,0 à 8 ppm entre les mêmes dates sur la fétuque élevée (98), de 12,9 à

4,0 ppm entre le début Avril et la fin Juin sur le dactyle, de 8,3 à 3,5 ppm entre les mêmes limites pour la fléole (67). Cette chute, plus lente ensuite reste continue jusqu'à la floraison (98) et se poursuivrait au cours de la maturation des semences (101).

Les légumineuses subissent également une baisse de leur teneur en cuivre mais celle-ci est irrégulière, peu importante et dépasse peu le stade floraison, les données étrangères sur ce sujet sont d'ailleurs assez contradictoires.

Des essais menés en France par l'INRA et l'ITCF ont permis de confirmer ces données générales et apportent davantage de précisions sur différentes espèces.

Ainsi (Tableau XII) on constate que l'appauvrissement de la fléole est très intense au cours de la période de pousse rapide de la plante ; au moment de la première coupe en vue d'ensilage, le fourrage est déjà très carencé pour l'animal ; seule une exploitation de type pâture pourrait correspondre à une teneur en cuivre à peine convenable (147).

La moyenne des 5 essais ITCF (Tableau XIII) donne des valeurs significativement décroissantes pour le cuivre du stade pâture au stade ensilage et enfin au stade foin (142).

Bien entendu chaque espèce a un comportement particulier, en fonction du sol et de l'année (75). Les vitesses de décroissance ne sont pas les mêmes entre les différentes espèces de graminées (Figure 3 a, b, c), ni entre les différentes variétés de luzerne (Figure 4). Chez les fétuques et les ray grass la décroissance du cuivre est régulière et se poursuit au delà de la floraison ; chez la fléole elle ralentit avant la fin de l'épiaison.

Quoi qu'il en soit, la décroissance générale des teneurs en cuivre au cours du premier cycle est très nette et systématique (Tableau XIV). Entre le démarrage de la végétation et la floraison ces teneurs sont divisées par 2,3 à 2,8 pour le cuivre. Les conséquences pratiques sont essentielles : les teneurs en cuivre sont près de deux fois plus élevées au

Tableau XII : Variation de la teneur en Cu de la fléole au cours du 1er cycle

S. Périgaud 1971 - INRA Theix 1970

Date	Stade de Végétation	Cu ppm MS
12 mai	Herbacé (20 - 30 cm)	6,2
22 mai	Début montaison (épi 1 à 3 cm)*	5,3
1er Juin	Mi-montaison (épi 13-15 cm)	3,0
19 juin	Début épiaison **	3,0
2 juillet	Pleine épiaison	3,2
8 juillet	Mi-floraison ***	2,3
* Stade normal de pâturage		
** Stade normal de récolte en vue d'ensilage		
*** Stade de récolte déjà tardif pour un foin		

Tableau XIII : Influence du stade de récolte sur la composition en
Cu - Mo de la première récolte (moyenne de 5 essais ITCF
en mg/kg MS)

F. de Montard et S. Périgaud 1975

Stade	pâturage (épi à 10 cm)	ensilage (début épiaison)	foin (pleine épiaison)	différence : statistique
Cuivre	7,4 **	5,9 *	5,0	HS - S
Molybdène	0,87	0,83	0,75	NS

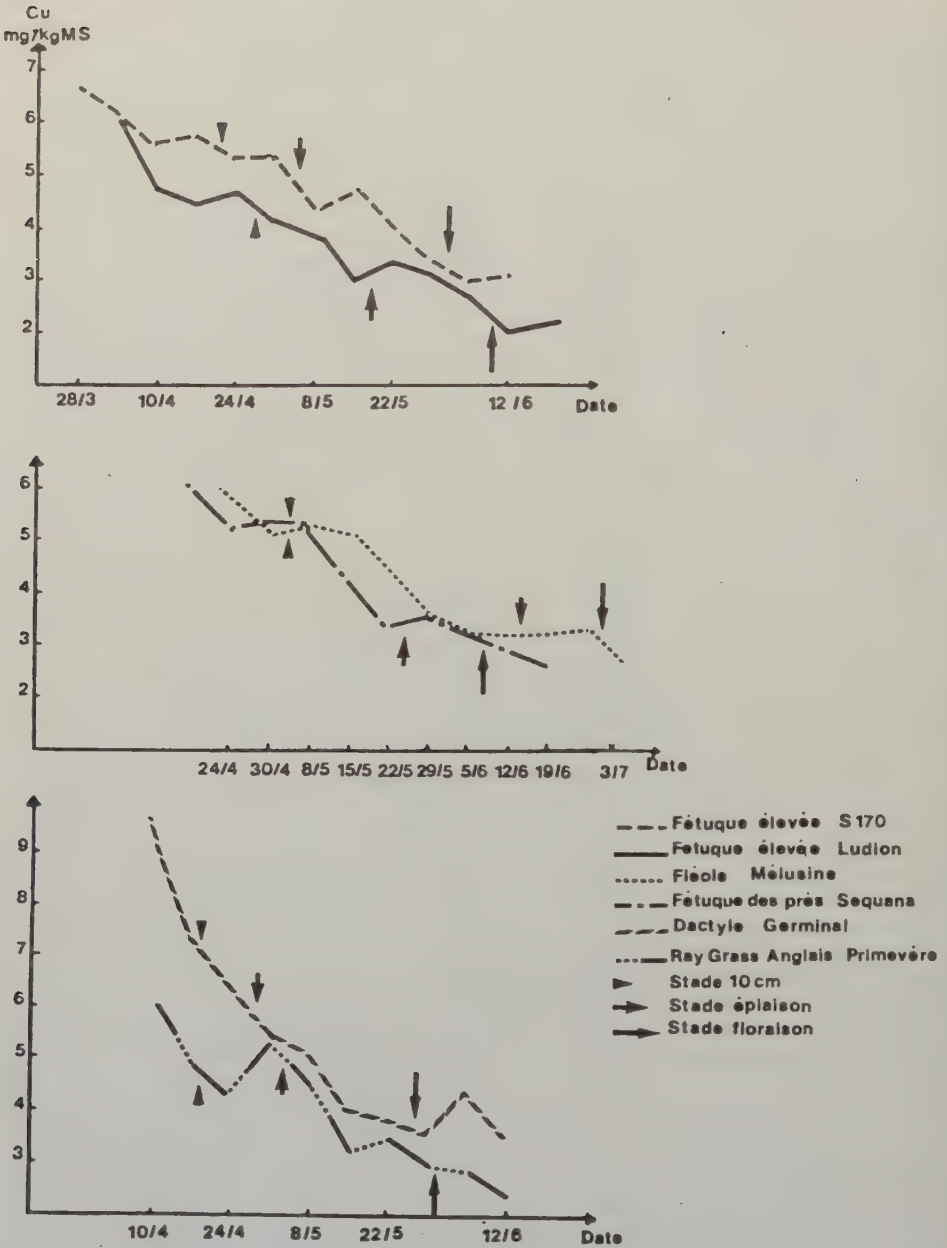


Figure 3 : Variation des teneurs en Cuivre de quelques graminées en fonction du stade (1er cycle - Lusignan 1968)

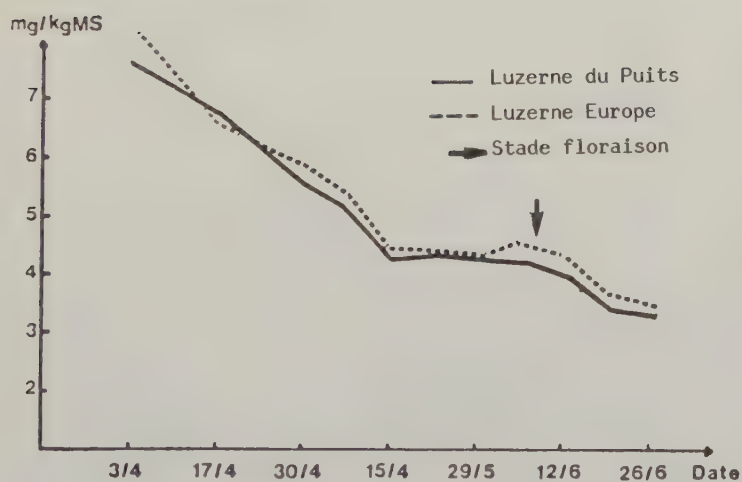


Figure 4 : Variation des teneurs en Cuivre des luzernes en fonction
du stade

Tableau XIV : Teneurs en cuivre des premiers cycles des graminées à différents stades de récolte

S. Périgaud et M. Coppenet 1975

Espèces	Sites	Cuivre mg/kg MS		
		Pâturage	Ensilage	Foin
R.G.I. Westerwold	Gremevilliers	1970 : 7,1	6,7	
R.G.A. Primevère	Lusignan	1968 : 5,3	4,9	3,0
Fétuque élevée Manade	Montpellier	1969 : 14,9	10,5	10,0
" " S 170	Montpellier	1968 : 11,1	-	6,9
" " S 170	Laqueville	1968 : 6,1	5,9	-
" " "	Crouelle	1969 : 15,6	7,2	6,5
" " "	St Bonnet	8,1	6,9	4,7
" " "	Lusignan	1968 : 5,7	5,3	3,4
" " Ludion	"	1968 : 4,7	3,0	2,0
Fétuque des prés Séquana	"	1968 : 5,4	3,4	3,2
Dactyle germinale	"	1968 : 7,4	6,5	3,9
Fléole mélusine	"	1968 : 5,1	3,2	3,3
Fléole mélusine	Theix	8,0	-	3,8
Sorgho grazer 1,70 m	Dijon	1970 : 10,0	4,4	-
80 cm	Lusignan	1971 : 6,1	2,8	-

stade pâture (épi à 10 cm) qu'au stade foin (début de la floraison) et chez la fléole le minimum est déjà atteint au moment de l'ensilage (début de l'épiaison) (152). C'est ce qui explique, en grande partie, la fréquence plus élevée des cas de carences sur les animaux en hiver dans notre pays.

c.2 - Effet sur le molybdène

La plante paraît très plastique vis à vis du molybdène et les conditions momentanées d'environnement peuvent avoir plus d'importance que le stade végétatif lui-même. Aussi les données recueillies dans la littérature apparaissent-elles très dispersées et contradictoires.

Ainsi Fleming (67) trouve une décroissance plus marquée que pour le cuivre sur le trèfle : de 0,12 mg/kg au stade 3° 4° feuille à 0,01 mg/kg à la pleine floraison. Le ray grass anglais ne subit pas de baisse significative mais les résultats sont très dispersés.

Les moyennes relevées dans les essais ITCF en France (Tableau XIII) ne donnent pas de variations significatives.

Par contre, en d'autres sites et en d'autres conditions, les taux de molybdène baissent régulièrement du stade pâture au stade foin (152).

d - Repousses et numéros de cycle

d.1 - Repousses

Lorsqu'un fourrage est coupé, les repousses herbacées sont enrichies surtout en cuivre (Tableau XV), puis la teneur tend à nouveau à décroître (Tableau XVI). La vitesse de décroissance apparaît, à un moment donné, variable avec la date de coupe précédente (Tableau XV).

Par suite, le pâturage d'herbes jeunes fournit à l'animal des oligoéléments en quantité plus importante que les foins, ceci indépendamment des interférences possibles avec les autres constituants de la ration (147).

Tableau XV : Variation de la teneur en Cu de la fléole au cours du 2ème cycle
(1970)
S. Périgaud 1971

Date	Cu ppm MS
Après la 1ère coupe début épiaison le 19 juin:	
19 Juin (Coupe)	3,0
16 Juillet	9,4
24 Juillet	9,6
4 Août	8,8
18 Septembre	7,5
Après la 1ère coupe mi-floraison le 8 juillet:	
4 Août	9,5
18 Septembre	5,7

Tableau XVI : Influence de l'âge de la repousse au pâturage sur ses teneurs en
Cu et Mo (INRA Laqueuille, Puy de Dôme, alt 1000m - 24 contrôles par chiffre)
F. de Montard et S. Périgaud 1975

	Age de la repousse	2 semaines	4 semaines	6 semaines
Cu ppm/MS	8,7	*	8,3	*
Mo ppm/MS	0,62		0,53	

7,7
0,52

Tableau XVII : Variation des teneurs en Cu des foins de prairies naturelles
1969 selon le numéro de coupe

Essais ITCF S. Périgaud 1971

Coupe	Lieu			
	Savoie	Meurthe et Moselle:	Haute Marne	
	Sainte Reine	Lenoncourt	Balesme	
	Date : Cu ppm/MS	Date : Cu ppm/MS	Date : Cu ppm/MS	
1ère coupe	13-6 : 4,4	2-6 : 3,4	12-6 : 4,2	
2ème coupe	24-7 : 7,0	15-7 : 6,4	25-7 : 7,2	
3ème coupe	8-9 : 7,8	23-9 : 6,2	12-9 : 10,0	
4ème coupe	17-10 : 7,4	-	21-10 : 7,6	

Pour le molybdène, les teneurs les plus élevées sont, comme pour le cuivre, dans les repousses de fin d'été. Mais Allcroft (1) recommande de mesurer le molybdène soluble dans l'eau, plus important pour l'animal, au lieu du molybdène total des fourrages ; or celui-ci est beaucoup plus élevé dans une herbe jeune en pleine croissance que dans une herbe âgée (19).

d.2 - Foins de second cycle et suivants

Les trois ou quatre coupes successives de la même prairie, soumise à un rythme d'exploitation par fauche suffisamment rapide, ont des compositions en cuivre très différentes, pouvant varier du simple au double (Tableau XVII) (147).

Cette loi se retrouve au niveau des différents types de prairies étudiées dans l'enquête nationale sur les fourrages (20) : les foins de prairies naturelles, les foins de légumineuses pures, les foins de prairies temporaires (à base de luzerne, de trèfle violet ou complexes), ont une teneur en cuivre significativement plus élevée pour la deuxième coupe, par rapport à la première coupe des mêmes régions (Tableau VIII). Cependant dans certains départements la différence n'est pas significative : la seconde coupe est en fait très subordonnée aux conditions climatiques, extrêmement variables d'une région à l'autre. Les regains, qui correspondent à la dernière coupe productive d'arrière saison sont beaucoup plus homogènes et toujours mieux pourvus en cuivre : 7,55 contre 5,27 mg/kg MS (20). Les analyses d'échantillons de prairies en provenance de plusieurs sites d'expérimentation confirment ces données : richesse relative des secondes coupes et surtout des regains par rapport aux premières coupes (Tableau XVIII) (146).

Les espèces pures, graminées ou légumineuses (Tableau XIX) et plantes diverses (Tableau VIII) traduisent les mêmes lois, déjà signalées par Kerguelen en 1960. Les nombreux échantillons prélevés sur les parcelles d'essai de l'INRA ou de l'ITCF ont des taux de cuivre qui peuvent plus que tripler entre la première et la dernière fauche, ceux de

Tableau XVIII : Teneurs comparées en Cuivre des foins de différentes coupes
Cu ppm/MS Périgaud 1970-1971

Origine	1ère coupe	2ème coupe	Regain (1)
Haute Savoie (Bas-Genevois)	3,3		5,3
Charente Maritime	4,6		11,8
	3,8	4,3	
	4,2	9,9	
Puy de Dôme (Combrailles)	5,6		7,0
	5,4		8,0
	4,6		11,8
	5,6		7,6
	5,2		8,0
	4,5		7,0
Puy de Dôme (Theix) (2)	4,3	6,7	
	5,4	7,8	9,0

(1) En altitude, le regain est la dernière exploitation (automne)
il peut être la 2ème ou la 3ème coupe de l'année

(2) Les échantillons de Theix proviennent de la même prairie ; les autres sont des mélanges des 1ères, 2èmes et 3èmes coupes de toutes les prairies de l'exploitation.

Tableau XIX : Teneurs comparées en Cu et Mo de fourrages lères et dernières coupes

S. Périgaud et M. Coppenet 1975

Espèces	Sites	Teneurs (en mg/kg MS)			
		Cuivre		Molybdène	
		lère	Dernière	lère	Dernière
Trèfle violet	Dijon	1968 : 8,5	9,5	1,10	0,80
Luzerne Europe	Lusignan	1970 : 4,6	6,7	0,33	0,12
	Montfavet	1969 : 9,4	10,7	1,28	1,67
	Crouelle	1971 : 8,0	8,1	1,16	1,30
R.G.I. Tlara	Lusignan	1968 : 2,0	7,7	0,58	0,73
R.G.A. Primevère	Lusignan	1969 : 2,8	7,6	0,50	1,43
	Vaudes (10)	1970 : 4,5	8,3	0,74	4,48
Fétuque élevée					
S 170	Lusignan	1968 : 3,2	4,2	0,38	2,57
	St Bonnet	1969 : 4,7	7,3	0,24	0,25
Fétuque des prés					
Séquana	Vaudes	1970 : 6,0	6,2	1,06	3,60
Dactyle prairial	Vaudes	1970 : 4,9	6,9	1,53	4,38
floréal	Theix	1973 : 4,7	6,2	3,56	4,24
Fléole pécora	Lusignan	1968 : 4,0	6,7	0,54	0,65
	Laqueuille	1970 : 3,6	7,2	0,61	1,41

molybdène peuvent être multipliés par 4 ou 6 et ainsi dépasser le seuil de toxicité pour l'animal (142) ; les écarts les plus importants correspondent à certains sols calcaires assez secs au printemps. Les luzernes sont un peu particulières en ce sens que ce sont les cycles intermédiaires qui sont légèrement mieux pourvus que les autres.

Les conséquences pratiques sont de la première importance : la première coupe, la plus pauvre en cuivre, est celle qui fournit le plus grand tonnage de matière sèche et, par suite, la plus grande partie des réserves de foin de l'exploitation (147). Les regains permettent souvent de franchir le seuil de carence animale mais, d'une part ils ne représentent qu'une partie assez faible des foin, d'autre part ils sont susceptibles d'avoir, sur certains sols, des taux de molybdène suffisants pour interférer avec le cuivre. Ces observations expliquent l'apparition fréquente, sur les troupeaux, des carences en fin d'hiver.

4 - Influence des Facteurs d'Environnement

Tous ces facteurs sont étroitement liés entre eux.

a - Le complexe sol-climat

a.1 - Le sol

Les études géochimiques et pédologiques nous ont conduit à la détermination d'aires géographiques de carences. Les études systématiques pour déterminer les corrélations existant entre les teneurs en oligoéléments du sol et celles de la plante sont encore limitées, mais confirment l'influence du type de sol sous des conditions identiques (climat - fertilisation).

Anke, Sasum, Oll et Graupe (10) ont montré que les luzernes contiennent moins de cuivre sur les granites que sur les grès bigarrés du Trias, sur schistes primaires que sur calcaires du Muschelkalk. Les pailles sur sables glaciaires sont beaucoup plus pauvres qu'ailleurs (158). Les sols lessivés mal drainés donnent des fourrages plus riches en molybdène que les sols à pseudogleys (105).

Les sols granitiques de Bretagne donnent des foins qui contiennent 4,14 ppm Cu, tandis que, sur schistes, la teneur moyenne est de 4,61 ppm Cu (38).

Les expérimentations françaises (Tableaux XX, XXII) confirment que les prairies sur sols granitiques ou sur sols bruns acides basaltiques sont parmi les moins bien pourvues en cuivre (142). D'autre part des teneurs relativement élevées en molybdène s'observent dans certaines localités sur des sols déjà signalés comme les plus riches (marnes du Bas-signy, alluvions plus ou moins hydromorphes d'Alsace).

Les données fournies par l'enquête sur les fourrages (Tableau XXI) concordent avec les prévisions pédologiques (20): les foins les plus pauvres sont issus des granulites, des granites à biotite, des gneiss et des migmatites ainsi que des sédiments primaires très anciens.

Les foins issus des basaltes ont des teneurs à peine plus élevées, ce qui confirme que l'altération subie au cours de la pédogénèse rend peu disponible le cuivre présent en quantité importante dans la roche mère.

Les sédiments calcaires donnent naissance à des fourrages pauvres (qu'ils soient sur socle jurassique, crétacé ou tertiaire) ainsi que les argiles à silex (Bassin Parisien). Par contre le "limon des plateaux" qui recouvre souvent les formations précédentes est mieux pourvu.

Les sols hydromorphes issus des formations détritiques siliceuses tertiaires ne donnent pas des fourrages particulièrement pauvres contrairement aux prévisions, peut être à cause de l'exploitation extensive et de l'excès d'humidité qui maintient le cuivre sous une forme relativement mobile.

Les alluvions fluviomarines des marais de l'Ouest donnent des foins relativement bien pourvus.

a.2 - Le climat

Le climat moyen, surtout par la pluviométrie et l'étagement des pluies tout au long de l'année, explique en partie les différences de composition des fourrages relevées dans des sites dispersés.

Tableau XX : Influences des conditions pédologiques en Alsace sur les teneurs en Cu - Mo des fourrages (graminées)

Essais INRA Colmar

F. de Montard et S. Périgaud 1975

Lieu	Cu ppm/MS	Mo ppm/MS	Origine du Sol
- Bernwillier (Sundgau) alt. 280 m pluv. 850 mm	6,3	-	Limon loessique pH = 8,1
- Hochstatt (Vallée de l'Ill) alt. 250 m pluv. 850 mm	6,9	2,00	Alluvions fines non calcaires res pH = 6,7
- Illhäusern (Ried) alt. 170 m pluv. 620 mm	7,7	1,95	Alluvions fines, sol hydro- morphe pH = 6,8
- Luttenbach (Münstertal) alt. 440 m pluv. 960 mm	7,3	1,25	Arène granitique pH 5,1
- Lapouttraie alt. 600 m pluv. 950 mm	6,8	1,17	Alluvions de la Fecht pH = 5,1
- Mittlach alt. 520 m, pluv. 1 500 mm	7,4	0,48	Grès Vosgien pH = 5,1
- St Gilles alt. 230 m pluv. 670 mm	8,9	0,62	Alluvions vallée Vosgienne pH = 5,5
	10,3	0,92	Alluvions granitiques pH = 5,7

Tableau XXI : Teneur en Cu des foins de 1ère coupe dans les différents types de sols

Bellanger J, Périgaud S., Lamand 1973

Roche mère	Lieu (N° département)	N	$\bar{X}$	$\sigma/\sqrt{N}$
schistes, micaschistes	7, 9, 15, 36, 63, 81, 85, 87	29	4, 93	0, 21
schistes	3, 7, 15, 19, 24, 36, 42, 56, 63, 87	62	4, 79	0, 13
gmatites + anatexites	15, 19, 23, 63, 87	33	4, 86	0, 15
anites	3, 7, 14, 15, 23, 42, 58, 63, 69, 79, 87	77	4, 84	0, 06
anulites	3, 7, 36, 44, 79, 85	13	4, 35	0, 28
schistes	15, 63	13	4, 97	0, 28
schistes	15, 63	29	5, 01	0, 20
schistes et schistes précambriens	14, 44, 49, 53, 79	33	4, 73	0, 18
schistes, schistes primaires	3, 14, 71, 81	19	4, 95	0, 24
schistes, grès, marnes, Trias	3, 7, 21, 52, 57, 70, 88	29	5, 24	0, 18
schistes, marnes, Lias	8, 18, 21, 24, 52, 57, 58, 70, 79	35	5, 18	0, 17
schiste Bajocien, Bathonien	8, 14, 21, 55, 58, 70, 79	36	5, 18	0, 16
schiste, marnes, Callovien, Oxfordien	8, 14, 55, 58, 70	26	5, 38	0, 16
schiste Raucacien, Séquanien	17, 24, 25, 55, 70, 79	33	5, 42	0, 16
schiste marneux Kimméridgien, Portlandien	17, 25, 55, 76	20	5, 67	0, 20
schistes, marnes, Crétacé	8, 9, 17, 24, 49, 76	44	5, 01	0, 15
schiste gréseux et glauconieux, Crétacé	2, 4, 51, 61, 72, 79	20	5, 49	0, 22
schiste à silex Crétacé	2, 17, 36, 76, 80	39	4, 71	0, 16
schiste, Crétacé	2, 10, 14, 51, 61, 76	25	5, 27	0, 22
schistes, argiles détritiques, tertiaire	3, 24, 32, 36, 40, 42, 45, 58, 78, 86	39	5, 34	0, 22
schistes gréseux, molasses, marnes tertiaires	9, 32, 40, 47, 64, 78, 82	42	5, 02	0, 14
schistes tertiaires cônes de déjection sud-Est	4, 84	17	5, 12	0, 24
schistes tertiaires	65	13	5, 18	0, 45
schistes des plateaux Miocène, Pliocène	2, 36, 45, 76, 78, 79	69	5, 28	0, 13
schistes fluviomarines	17, 85	9	5, 45	0, 23
schistes glaciaire	1, 4, 12, 38, 64, 73, 74	16	5, 18	0, 30

Il agit sur la production de matière sèche (dilution plus ou moins grande des minéraux et des oligoéléments) ainsi que sur le sol (solubilisation des ions donc disponibilité plus grande des oligoéléments, lessivage).

b - Le climat de l'année

Toutes les autres conditions étant comparables (même site, même stade végétatif, mêmes espèces) la teneur en cuivre des fourrages peut varier du simple ou double, d'une année à l'autre (68).

En France, les foins de prairies naturelles, considérés sur l'ensemble du territoire, sont significativement plus riches en cuivre en 1970 et 1971 qu'en 1969 (Tableau XXIII) (20). Les espèces pures des différents réseaux d'expérimentation ont également, en un même site et à un stade donné, des teneurs en cuivre variables d'une année à l'autre, dans les limites de 20 p 100 soit 1,0 à 1,8 mg/kg MS ce qui peut permettre de franchir une limite de carence (Tableau XXIV) (152).

C'est ainsi que des symptômes de carence en cuivre signalés en Normandie en 1967 n'ont pas été retrouvés en 1968 ; l'analyse des foins des mêmes exploitations a révélé des taux de cuivre de 3,0 à 5,5 ppm en 1967 contre 4,6 à 9,9 en 1968 (147).

L'influence de l'année est beaucoup plus importante sur le molybdène en raison de la plus grande sensibilité de cet oligoélément dans le sol aux variations de pH et d'humidité (152) (Tableau XXII).

Les pluies du mois de mai sont signalées comme ayant une action prépondérante sur la composition de la récolte (19, 146). Une sécheresse prolongée de printemps qui limite la croissance, puis une période de pluie qui retarde le développement des plantes donnent moins de matière sèche mais des fourrages plus riches en cuivre qu'en année normale (75).

Si les variations ne sont pas identiques pour des espèces fourragères différentes (Tableau XXIV) elles ne le sont

Tableau XXIII : Effet de l'année sur la teneur moyenne en Cu des foins de prairies naturelles
J. Bellanger, S. Périgaud et M. Larnand 1973

Année	Nb échantillons	Cu ppm/MS
1969	77	4,93 *
1970	78	5,40
1971	17	5,34

Tableau XXIV : Variation des teneurs en Cu de quelques fourrages selon les années
S. Périgaud et M. Coppenet 1975

Espèces	Sites	Cu ppm/MS	Espèces	Sites	Cu ppm/MS
Trèfle vio-	Rennes	8,7	Dactyle floral	Lusignan	1969 : 4,2
let Kuhn	1971 : 6,9			1972 : 5,3	
	1972 : 7,7		Fléole Pécora	Lusignan	1968 : 4,0
Luzerne	Rennes	10,0		1969 : 3,7	
Europe	1972 : 8,2		Ray grass Anglais:		
	Lusignan	4,3	Bocage	Lusignan	1969 : 2,4
	1970 : 4,9			1970 : 3,8	
	1971 : 6,4		Fétuque él. S170	Lusignan	1968 : 5,6
	1972 : 5,4			1970 : 3,6	

Tableau XXV : Variations saisonnières des teneurs en Cu - Mo (ppm/MS)
F. de Montard et S. Périgaud 1975

		Pin au Haras - Orne - sol alluvial pH = 6,5	
a) Rythme pâture		: Avril et Mai	: Juin à Août : Sept. à Nov.
Cuivre	: 5,3	: *: *	: 6,4 *: *
Molybdène	: 0,44	: *: *	: 0,48 *: *
b) Rythme fauche : Alsace 8 localités			
		foins	
		regains	
Cuivre	: 8,1	: *: *	: 10,1
Molybdène	: 0,78	: *: *	: 1,62

pas obligatoirement pour une même plante entre parcelles voisines (123) ; les mêmes conditions météorologiques agissent sur la plante par l'intermédiaire du sol avec les conséquences classiques sur son drainage, sa vie microbienne, la dynamique des ions ... etc..

c - La saison

L'effet de la saison sur les teneurs en oligoéléments du fourrage est étroitement lié au climat, au sol et au mode d'exploitation.

Au Pin-au-Haras, en sol alluvial à pH 6,5 en exploitation pâture (c'est-à-dire au rythme de la pousse), les teneurs en cuivre augmentent du printemps à l'automne tandis que les teneurs en molybdène ne varient pas significativement (Tableau XXVa). En Alsace, sur sols variés, la teneur des foins en première coupe en cuivre et molybdène est moins élevée que celle des regains (Tableau XXVb) (142).

En pratique les fourrages de fin d'été ou d'automne sont plus satisfaisants pour les besoins en cuivre que les foins ou les pâtures de la première partie de saison. La toxicité du molybdène pourrait se manifester plus facilement à l'automne dans les localités où ce risque existe (142).

5 - L'Influence des Techniques d'Exploitation et des Techniques Culturelles

a - Le mode d'exploitation, de récolte, de conservation la date du semis

a.1 - Le mode d'exploitation de l'herbe semble influencer sur sa composition ne serait-ce que parce qu'il modifie le rapport tiges-feuilles et la proportion de matériel jeune par rapport au matériel âgé (19). Les données en ce domaine sont assez imprécises et le contrôle d'expérimentations avec pâture est rendu analytiquement difficile par la contamination apportée par les animaux.

Tableau XXVI : Teneurs en cuivre des lères et dernières coupes de quelques fourrages
sous 2 rythmes d'exploitation (Cu mg/kg MS)

S. Périgaud et M. Coppenet 1975

Espèces	Sites	Système pâture		Système fauche		
		1°	dernière:	1°	dernière:	
		coupe:	coupe	coupe:	coupe	
R.G.I. Westerwold	Gremevilliers	1970	7,1	10,1	6,7	9,1
Fétuque élevée S 170	Laqueville	1968	6,1	8,1	5,9	7,0
	St Bonnet (15)	1969	8,1	7,3	4,7	7,0
	Crouelle	1969	15,6	7,2	6,5	7,2
Dactyle floral	Laqueville	1971	9,3	9,2	8,9	8,2
Fléole Maintenan	Laqueville	1968	4,9	6,4	2,4	5,6
Pécora	Lusignan	1972	5,7	4,1	3,7	5,0

Sur les sols alluviaux proches de la neutralité du Pin-au-Haras, le mode d'exploitation de l'herbe, en pâturage réel avec retour des excréments, ou en zéro pâturage, ne modifie toujours pas, après cinq ans de traitements différenciés, la nutrition en cuivre et en molybdène des fourrages (142).

Toutefois, un rythme d'exploitation rapide permet une première exploitation à un stade plus précoce, puis des pâcages ultérieurs à intervalles plus rapprochés, donc d'herbe toujours plus jeune. En conséquence, un rythme pâture tend à homogénéiser les différences de composition entre cycles (Tableau XXVI) (152).

a.2 - Dans certaines régions, les premiers cycles sont parfois "déprimés" par un passage précoce des animaux à la sortie de l'hiver, avant même que les épis de graminées n'aient commencé la montaison. Ce "déprimage" a pour but de raser l'herbe sans toucher aux ébauches d'épis. Cette méthode améliore les teneurs en cuivre, quoique modestement (Tableau XXVII) (142).

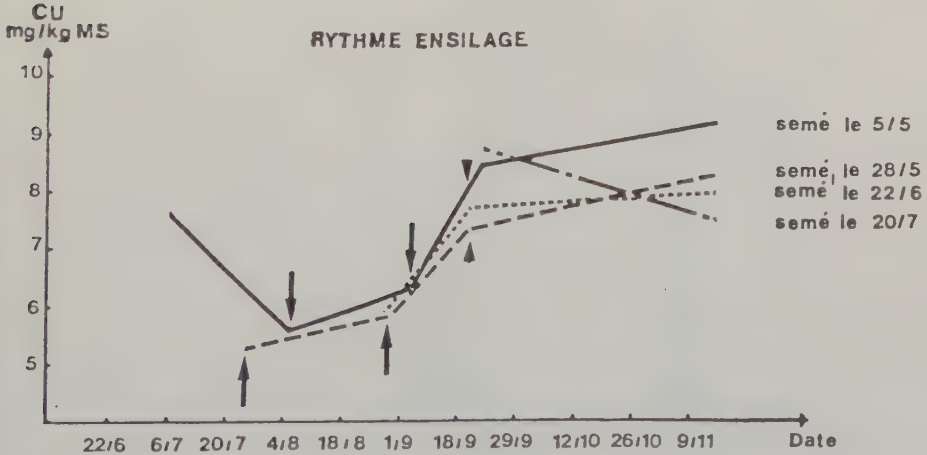
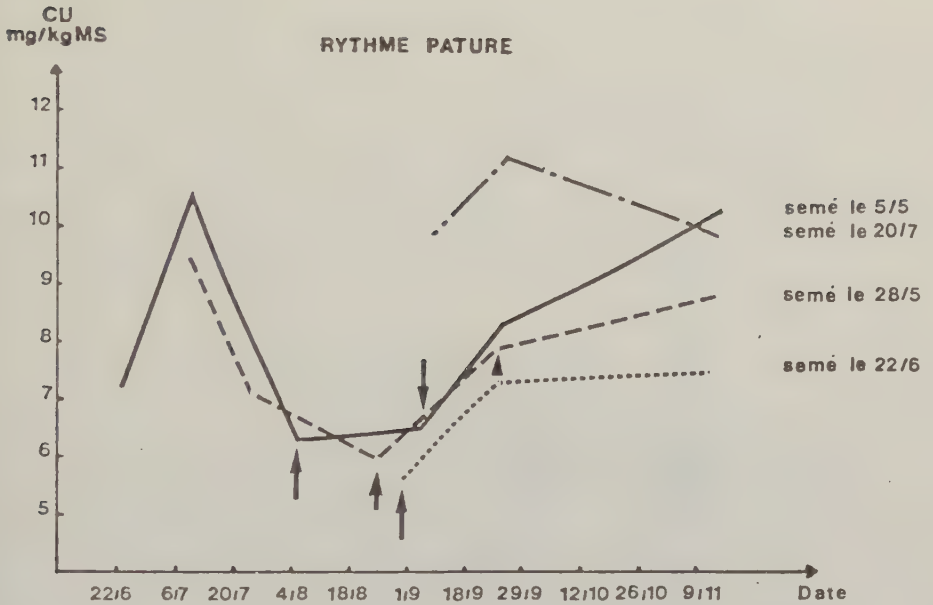
a.3 - Le mode de récolte et de conservation des fourrages a un rôle double sur les teneurs en cuivre, d'un côté par le stade végétatif de la plante, de l'autre par la technique même de conservation.

- Les foin sont récoltés à une période du stade végétatif (pleine épiaison) où les teneurs en cuivre sont faibles et d'autant plus que la fauche est tardive (146). Le procédé du fanage conduit à des pertes importantes de feuilles (les plus riches en cuivre) au cours des manipulations (19). Le lessivage du cuivre, s'il est insignifiant dans le foin séché sur pré et compensé par les pertes inévitables de matières organiques (75) est au contraire intense si le foin est récolté en période de pluie (101).

- Les ensilages sont récoltés plus tôt (début épiaison) et les pertes sont limitées par rapport au foin. L'action enzymatique importante aidant, ils arrivent à être significa-

Tableau XXVII : Influence du déprimage sur la composition en Cu des foins
INRA, Laqueuille Puy de Dôme F. de Montard et S. Périgaud 1975

Date	Témoïn	Déprimé
7-7-1972	3,2	3,9
12-7-1972	4,0	4,7



- ▲ 10% au stade épiaison
- 20% au stade épiaison
- 50% au stade épiaison

Figure 5 : Teneurs en Cuivre du Ray grass Italien (Westerwold)
semé à différentes dates

Tableau XX VIII : Influence du chaulage et de la fertilisation sur la teneur en Cu de la fétuque élevée S 170
INRA Feyt (Corrèze) 1969
S. Périgaud 1971

	Cu en mg/kg MS			
N° de coupe	sans calcaire		avec calcaire	
	sans NPK	Avec NPK	sans NPK	Avec NPK
1ère coupe	5,8	5,0	3,6	3,4
2ème coupe	6,6	5,2	4,4	3,4
3ème coupe	7,0	5,0	4,4	3,4

tivement plus riches que les foins (20, 87) (Tableau VI).

a.4 - La date du semis a beaucoup d'importance sur la composition du fourrage la première année : les cycles qui peuvent épier et qui correspondent à un maximum de production sont beaucoup plus pauvres que les autres ; une épiaison à 50 p 100 correspond à une herbe moins bien pourvue que si l'épiaison est à 10 p 100 (Figure 5 a, b) (152).

b - Les Amendements

b.1 - Les amendements calcaires

Il est connu depuis longtemps que les amendements calcaires, par modification du pH du sol, perturbent profondément le comportement de certains ions et peuvent provoquer des toxicités molybdiques (143, 163) ou constituer un remède aux carences en molybdène (39).

La recalcification des sols de semi-altitude au moment de leur reconversion en bonne prairie peut bloquer certains oligoéléments (Cu, Zn, Co) dans le sol et par conséquent diminuer les teneurs dans les fourrages (152) : ainsi, une fétuque élevée de premier semis voit sa teneur en cuivre baisser de 20 à 40 p 100 sur tous les cycles par rapport au témoin (Tableau XXVIII). Ce résultat est bien connu sur tous les sols pauvres dont on perturbe l'équilibre naturel par une mise en valeur culturale (163).

Les essais réalisés sur prairie naturelle confirment ces données : augmentation des teneurs en molybdène et baisse du cuivre dans les fourrages avec 4 tonnes de chaux à l'hectare (Tableau XXIX). L'effet moins net sur le cuivre, paraît en liaison avec le taux et la forme de matière organique du sol, dont la vitesse de minéralisation est conditionnée en partie par l'apport de chaux (146).

Tableau XXIX : Influence des amendements sur la composition Cu et Mo d'une prairie
Essai INRA - SEI Marcenat (Cantal) Périgaud et Bellanger 1972
Sol brun acide - F = fumier 20 t/ha - Ca = chaux hydratée 4 t/ha.

		Cuivre mg/kg MS		Molybdène mg/kg MS			
		Témoin	+ F	+ Ca	Témoin	+ F	+ Ca
1966	1ère coupe	4,8	5,8	4,4	0,75	0,82	1,19
	2ème coupe	8,1	8,0	7,7	1,07	1,12	2,13
1967	1ère coupe	6,5	5,5	5,6	0,59	0,78	1,05
	2ème coupe	8,7	6,9		0,92	0,76	1,16
1968	1ère coupe	6,7	6,3	6,1	0,62	0,71	0,73
	2ème coupe	8,3	7,4	7,6	0,61	0,49	
1969 moyenne 2 coupes		7,2	6,7	6,7	0,76	0,78	1,19**

b.2 - Amendements humiques

Ils apportent, par eux-mêmes des oligoéléments et peuvent, selon leur nature, leur importance, le sol et les autres conditions de milieu, ou favoriser la libération des oligoéléments inclus dans la "vieille matière organique" inerte, ou les maintenir inaccessibles à la plante dans un turn over microbien actif (146, 150). Leur action peut donc être favorable ou non selon le cas, et s'inverser au cours des années qui suivent l'épandage (Tableau XXIX).

b.3 - Le Gypse

Les effets sur le cuivre, contrairement au manganèse sont négligeables deux ou trois ans après l'apport (Tableau XXX).

c - Fertilisation en éléments majeurs

L'emploi des engrais majeurs (azote, phosphore et potasse) est largement répandu dans le monde en général et en France en particulier. Si les effets sur les rendements sont bénéfiques et admis de tous, les conséquences au niveau de l'équilibre minéral des fourrages sont sujettes à de larges variations suivant les types de sols, suivant les doses ... Par suite, il apparaît utile de cerner les effets de ces composés afin de prévoir les répercussions au niveau des carences animales.

c.1 - Notions générales

La fertilisation en éléments majeurs peut modifier profondément les teneurs en cuivre des fourrages par le biais de nombreux facteurs tant au niveau du sol que de la plante, en agissant à la fois sur les équilibres entre ions et sur la production totale en matière sèche (19, 146).

Tableau XXX : Influence d'un amendement de gypse et du niveau de fertilisation NPK sur les teneurs en Cu - Mo dans un pré salé.

Essai St Laurent-de-la-Prée (Charentes Maritimes)
Moyennes des années 1968 - 1969 - 2 coupes/an, teneurs en mg/kg MS
F. de Montard et S. Périgaud 1975

N - P - K	Rendements T. MS/ha	Cu	Mo	
			1° c. 1968	2° c. 1968
0- 0- 0	6,4	7,4	0,99	1,03
100- 60- 60	10,3	6,3	)	1,04
160-120-120	12,1	6,4	)	)
100- 60- 60) + gypse	)	6,1	)	1,08
160-120-120) en 1965	)	6,2	)	)

c.1.1 - Equilibres entre ions

Il y a antagonisme entre deux ions lorsque l'augmentation de l'un élève l'optimum de concentration de l'autre. On connaît ainsi les antagonismes Cu - Mg, Cu - Mo, Cu - Fe (52), Mo - Mn, Mo - SO_4^{--} , Mo - K (19), NO_3^- - Mo.

Il y a synergie lorsque la présence de l'un augmente l'utilisation de l'autre : Mo - PO_4^{---} .

- Au niveau du sol certains constituants, les hydroxydes, bloquent énergiquement les éléments tels que phosphore, cuivre et molybdène. Les matières organiques brutes, difficilement minéralisables, immobilisent sévèrement phosphore et cuivre (II, 141). Or l'importance de ces constituants varie beaucoup d'un sol à l'autre et l'effet d'un nutriment donné enrichit plus ou moins la plante, selon que l'élément est très ou peu retenu par le sol.

Par ailleurs, certains engrais modifient le pH du sol et par conséquent l'état, dans le sol des éléments sensibles au pH tels que molybdène, manganèse et à un degré moindre le cuivre (148).

- Au niveau de la plante on retrouve des phénomènes de compétition et de sélectivité des ions dans les mécanismes d'absorption, de transfert et d'accumulation vers les parties aériennes.

c.1.2 - Augmentation de la matière sèche

Lorsque la réserve disponible en cuivre du sol n'est pas très importante, une bonne fertilisation en azote, phosphore et potassium a pour conséquence la dilution du cuivre absorbé dans une masse de matière sèche formée plus importante, d'où une baisse des teneurs en cet élément (99).

c.1.3 - Conséquences

L'effet de la fertilisation sur la composition minérale des fourrages est très complexe. Il dépend du type de fourrage (espèces pures ou mélanges) (85), de la précocité de son exploitation et de son cycle (98, 99), des conditions climatiques (85), du niveau des réserves disponibles en tous

Tableau XXXI : Influence de la fumure azotée sur la composition en Cu et Mo de quelques graminées Essai INRA Lusignan 1969 S. Périgaud 1974

Dose d'Azote (kg N/ha)		N = 0		N = 250		N = 500		N = 1000	
Espèces	date	Cu	Mo	Cu	Mo	Cu	Mo	Cu	Mo
Variétés	coupe								
Ray grass an-	9-5	2,7	0,93	2,8	0,50	3,5	0,58	4,0	0,56
glais	27-6	4,9	1,73	5,6	1,75	5,3		4,5	1,46
primevère	8-8	7,3	4,02	6,3	2,86	6,5	2,57	6,2	1,70
(précoce)	24-9	9,6	2,21	8,4	1,14	10,0	0,73	9,6	0,53
	20-11	7,5	1,45	7,6	1,43	9,2	1,11	8,0	0,89
Dactyle floréal	9-5	5,7	1,19	4,2	0,96	4,7	0,66	5,0	0,73
(demi-précoce)	27-6	3,2	3,40	5,5	2,32	6,0	1,50	6,5	1,70
	8-8	4,0	6,40	5,2	2,64	6,2	1,74	6,7	1,41
	24-9	5,3	5,40	7,7	2,56	9,0	1,44	10,0	1,34
	20-11	7,2	5,00	7,7	4,22	8,5	1,78	9,5	1,41
Fétuque des	20-5	2,7	1,10	3,0	0,67	3,0	0,47	2,5	0,44
prés Séquana	7-7	4,2	2,03	6,0	1,79	5,0	1,12	4,5	0,87
(demi-précoce)	19-8	5,0	1,49	6,5	1,04	6,5	1,07	5,7	0,72
	6-10	5,0	1,33	5,7	0,94	6,2	0,85	6,2	0,50
	25-11	4,5	1,58	6,2	1,59	6,2	1,11	6,0	0,91
Fétuque élevée	5-5	2,0	0,77	3,5	0,61	3,7	0,49	4,0	0,47
S 170	24-6	2,0	3,30	3,7	1,0	3,5		4,0	0,77
(demi-précoce)	28-7	3,2	6,4	3,7	2,2	4,0	1,65	4,2	0,92
	17-9	2,0	4,3	5,0	1,58	6,2	0,80	6,0	0,51
	19-11	3,5	4,1	5,5	2,70	5,7	1,01	5,7	0,49
Fléole Pécora	16-5	3,7	0,35	4,0	0,65	4,5	0,65	5,5	0,82
(demi-précoce)	30-6	5,0	0,64	4,7	0,73	4,2	0,80	4,0	1,13
	8-8	4,0	0,61	6,2		6,5		4,7	0,99
	24-9	8,0	2,02	6,7	0,54	7,0		7,2	0,84
Ray grass	16-5	1,7	0,66	3,0		3,2		4,2	0,62
d'Italie	27-6	2,7	1,76	4,5		4,2		4,7	0,62
Tetronc	22-7	4,7	2,58	6,2		5,2		4,5	0,79
	25-11	6,0	1,37	7,0		7,2	0,87	7,2	

nutriments dans le sol au moment où la plante en a le plus besoin (163), des doses et des formes d'engrais (146, 148). La fertilisation ne peut donc pas avoir à priori les mêmes conséquences partout en toutes conditions.

c.2 - La fertilisation azotée

c.2.1. - Effets sur le cuivre

Les fumures azotées ont des effets irréguliers, positifs ou négatifs, insignifiants ou marqués sur les teneurs en cuivre des fourrages. En Irlande où les sols sont carencés, les prairies fertilisées ont des teneurs très basses en cuivre (5 à 2,5 ppm selon la date) (68) et par suite des hypocuprémies importantes apparaissent sur les troupeaux. En Ecosse, l'azote est bénéfique sur certains sols, la teneur moyenne en cuivre passant de 6,6 à 9,5 ppm (85), mais il fait baisser les teneurs de 4,7 à 4,4 ppm en sol pauvre (163).

Kerguelen (99) attribue la baisse du taux de cuivre dans la plante à une dilution de l'élément dans une masse de matière organique formée plus importante. Mais en fait cette variation du cuivre n'est pas parallèle à l'augmentation de rendement, le maximum de teneur en cuivre est obtenu pour une dose optima d'azote fonction du sol, de la flore, du numéro de coupe et de l'année (147, 148) ; cette dose est faible en sol pauvre et élevée en sol riche (150).

- Le comportement spécifique des différentes espèces de graminées vis à vis de l'azote a été étudié sur plusieurs sites.

* Dans l'essai INRA de Lusignan (Tableau XXXI) les doses annuelles d'azote sont croissantes de 0 à 1000 kg/ha. La fétuque des prés est peu touchée par la dose en premier cycle ; par contre, en second et troisième cycle, l'apport optimum, vis à vis du cuivre, se situe entre 250 et 500 kg/ha. La fétuque élevée voit sa teneur non seulement doublée en premier cycle par 1000 kg d'azote, mais aussi toujours d'autant plus augmentée que l'apport d'azote est plus fort, et ceci de façon substantielle pour le cycle de septembre (x3) ;

250 kg suffisent d'ailleurs à enrichir notablement cette graminée. Sur la fléole, seul le premier cycle est enrichi en cuivre par l'azote, mais non les suivants (148, 150).

* Dans l'essai ITCF de Vaudes, (Tableau XXXII) on retrouve les mêmes tendances, mais éventuellement à des niveaux de cuivre plus élevés et avec une efficacité différente (148).

* Signalons aussi qu'en un site donné, les résultats ne sont pas identiques deux années de suite (figure 6).

- Sur les prairies naturelles, la fumure azotée tend à modifier la composition floristique (148) ; ainsi, la tendance à la disparition des légumineuses sous de fortes doses d'azote appauvrit encore plus le fourrage en cuivre (146). Quoiqu'il en soit les conséquences globales sur la teneur en cuivre sont sensiblement les mêmes que sur graminées pures : l'optimum d'azote est situé relativement bas en sol pauvre (0 à 80 kg) et plus élevé ailleurs (141, 152) ; ce n'est pas celui qui fournit le plus de matière sèche. De plus le cumul des fortes exportations sur plusieurs années aboutit à une baisse régulière des teneurs en cuivre au cours des ans, tandis qu'avec de faibles doses d'azote les variations de teneurs sont capricieuses (Tableau XXXIII) (142).

- Le sol influe par la plus ou moins grande disponibilité du cuivre aux racines (163). C'est pourquoi sur prairies naturelles les doses optima d'azote sont variables avec les sites (Tableau XXXIV).

A la limite, sur certaines prairies de montagne en sol pauvre (147) et sur certains sols en cours de reconversion (152) un faible apport de 40 kg d'engrais azoté rend le fourrage encore plus carencé en cuivre que le témoin sans azote. Par contre, sur des sols guéris de leur carence initiale, dans le Massif armoricain, l'azote augmente les teneurs en cuivre du ray grass d'Italie de 5 à 15 p 100, parfois 35 p 100 (152).

En exploitation de type pâture sur des alluvions jeunes en fond de vallée, la dilution du cuivre dans les fortes productions obtenues par l'azote n'est pas compensée par une

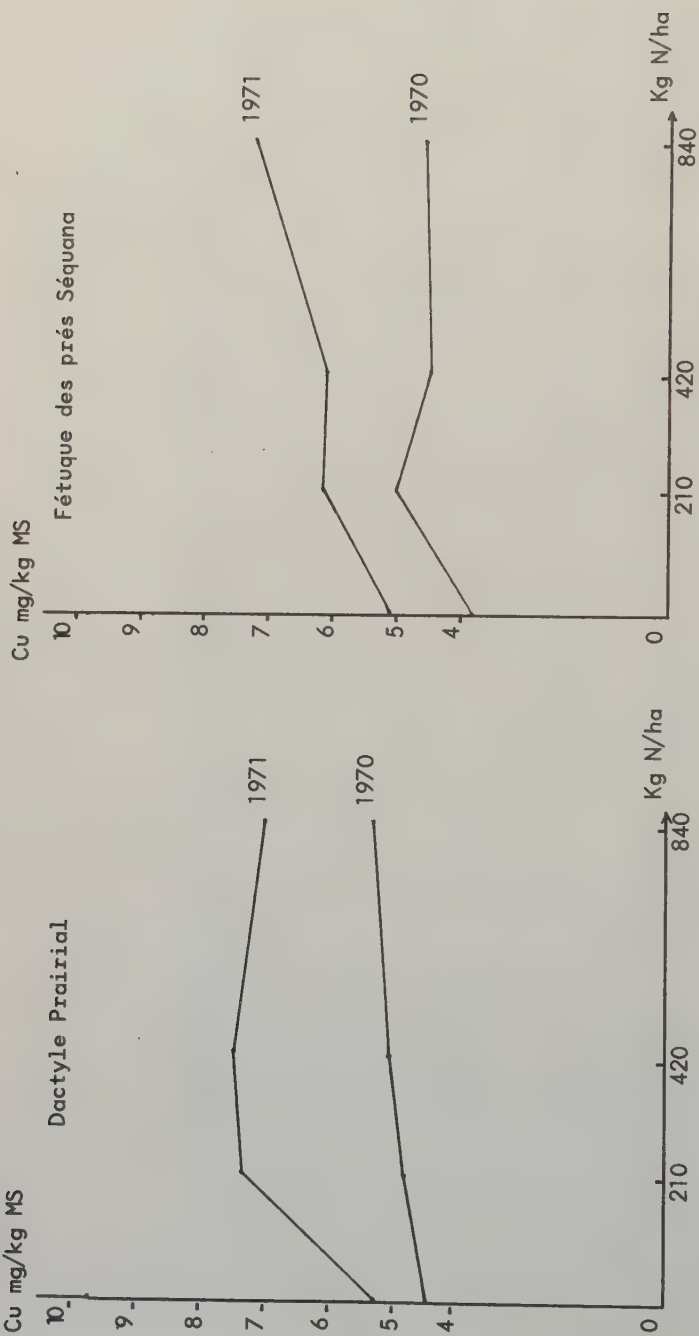


Figure 6 : Influence de la fumure azotée sur la teneur en Cuivre de la 1ère coupe.
(début épiaison) (Essai ITCF Vaudes)

Tableau XXXIII : Evolution des teneurs en Cuivre (ppm MS) sur quatre ans selon le niveau de fertilisation azotée F. de Montard et S. Périgaud 1975
Essai INRA, Pin-au-Haras Orne, moyennes des coupes par an

	1968	1969	1970	1971	Observations
NO et N 80	7,6	7,1	7,6	6,9	Variations capricieuses
Coteau N 160 et N 320	7,9	7,5	7,1	6,8	Baisse régulière
NO et N 80	7,1	6,8	7,2	6,3	Variations capricieuses
Vallée N 160 et N 320	7,1	6,2	5,9	5,6	Baisse régulière

TABLEAU XXXIV : Influence de la dose d'azote sur la teneur en cuivre de différentes
 prairies naturelles 1969 - 1ères coupes
 Essais ITCF (teneurs des graminées)
 S. Périgaud 1971

Lieu	Dose d'azote kg/ha			
	0	80	160	240
Cantal : St Bonnet de Salers	4,2	5,0	6,0	4,8
Savoie : Sainte Reine	4,4	4,8	5,2	5,0
Meurthe et Moselle : Lenoncourt	3,4	3,8	4,6	5,2
Haute Marne : Balesme	4,2	4,2	5,2	4,2
Mayenne : St Pierre sur Orthe	4,6	5,4	4,2	4,6

plus grande fréquence de coupe, c'est-à-dire une herbe plus jeune. Sur coteau calcaire les taux de cuivre se maintiennent (Tableau XXXV) (142).

- La forme de l'engrais azoté joue un rôle (146) : sur un sol brun calcaire formé sur alluvions modernes, on constate que le sulfate d'ammonium peut être dépressif par rapport aux autres formes d'azote (nitrate de chaux et nitrate d'ammonium) en troisième coupe (Tableau XXXVI).

Des travaux plus récents, réalisés sur des cultures sans sol à l'aide de solutions nutritives de composition parfaitement connue en azote et en cuivre, il ressort que (26) :

* l'influence de l'apport d'azote sur la teneur en cuivre du fourrage est fonction de la disponibilité du cuivre dans le milieu : une intensification de la fertilisation azotée n'entraîne une augmentation du taux de cuivre dans le fourrage que si le cuivre disponible pour la plante est largement excédentaire. Dans les autres cas elle conduit à une dilution du cuivre dans les tissus.

* à égalité d'azote dans le milieu, la nutrition ammoniacale fournit un matériel végétal plus riche en cuivre que la nutrition nitrique.

c.2.2 - Effets sur le molybdène :

L'azote a un effet beaucoup plus net et constant sur le molybdène il est toujours dépressif, tout au moins sur les graminées (163).

- Sur les espèces pures, on constate que la diminution du taux de molybdène est d'autant plus marquée que la plante, en l'absence d'azote est riche (148, 150). Ainsi (Tableau XXXI et figure 7) la fétuque des prés et la fléole, qui ne contiennent pas beaucoup de molybdène, sont peu touchées. Par contre, la fétuque élevée, le dactyle, le ray grass anglais, dont certains cycles dépassent les seuils de toxicité animale dans le témoin, ont sous azote des teneurs normales et d'autant plus basses que la dose est plus élevée (148). Pratiquement l'azote tend à annuler la spécificité variétale vis à vis

Tableau XXXV : Influence de la fumure azotée sur la teneur en Cu de l'herbe
Essai INRA Pin-au-Haras Orne : Moyennes des coupes sur 4 ans
F de Montard et S. Périgaud 1975

:	:	Doses d'azote en kg/ha/an			:
		0	80	160	
:	Lieu				:
:					:
:	En fond de vallée	7,1	6,5	6,2*	6,1*
:	Sur coteau sec	7,2	7,1	7,1	7,2
:					NS
:					:

TABLEAU XXXVI : Influence de la dose et de la forme d'azote sur les teneurs en Cuivre du dactyle
Essai INRA Dijon (sol brun calcaire sur alluvions modernes)
S. Périgaud 1970

Traitement	1ère coupe : 10-5-67	2ème coupe : 19-6-67	3ème coupe : 29-9-67
N = 100			
Nitrate de chaux	5,6	6,0	6,2
N = 240	**	**	**
Nitrate de chaux	6,6	7,0	6,8
Nitrate d'ammonium	6,7	6,8	6,9**
Sulfate d'ammonium	6,7	6,7	6,3

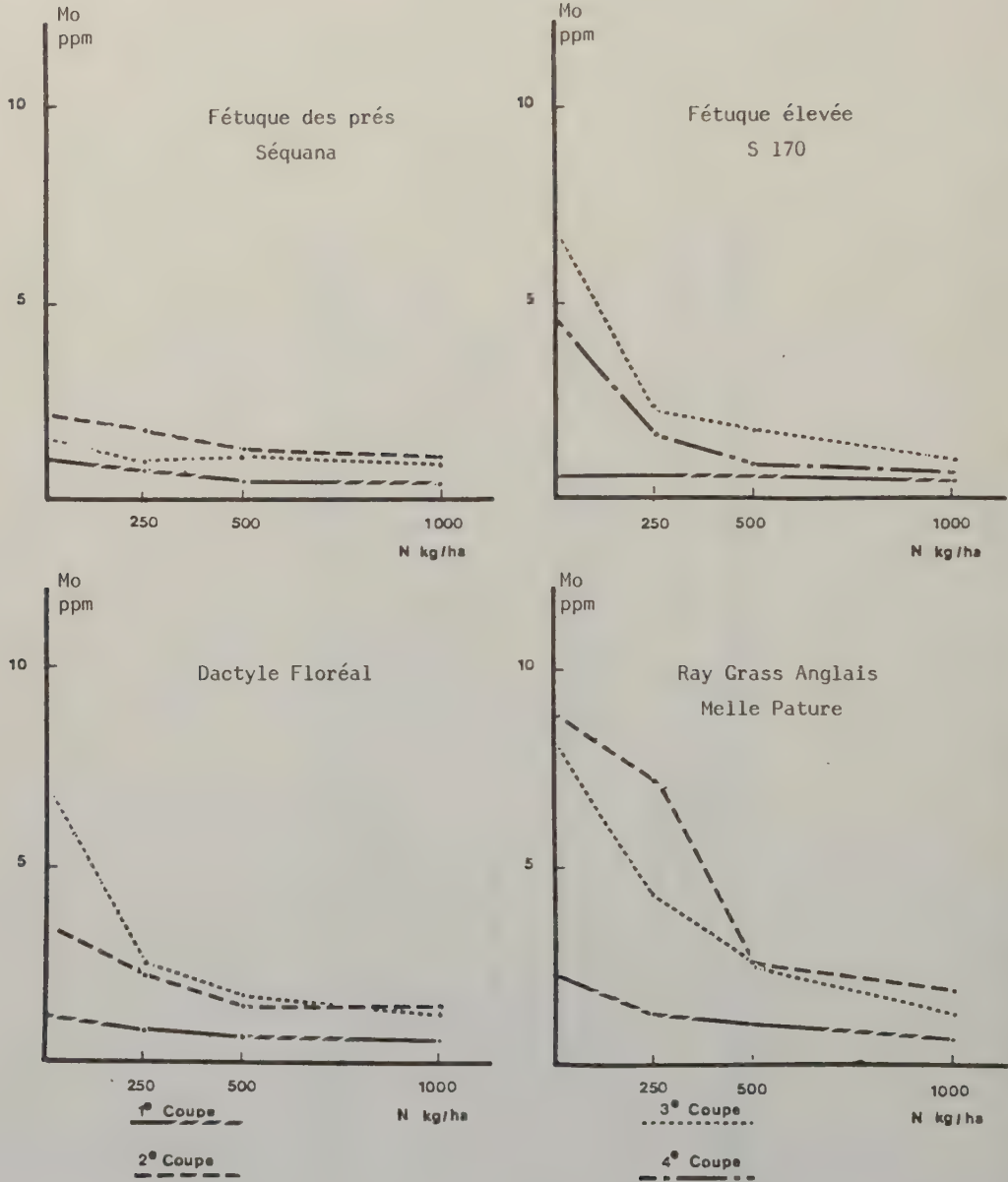


Figure 7 : Influence de la fumure azotée sur le taux de Molybdène

du molybdène et diminue donc les risques de molybdénose (150) surtout dans les cycles riches de fin d'été (85).

Notons cependant que dans certains sols où le molybdène est abondant et très disponible, les taux peuvent rester élevés en fin de saison dans la plante, même sous de fortes doses d'azote (Tableau XXXII) (148). Dans quelques cas (ray grass anglais et fétuque des prés en deuxième et troisième cycles), sur sols calcaires, la fumure azotée permet une augmentation importante des taux de molybdène (152, Tableau XXXII).

- Des résultats analogues sont observés sur prairies dont la complexité de la flore atténue cependant l'amplitude des variations (Périgaud non publié).

De cette étude nous retiendrons surtout l'existence d'un optimum dans l'apport d'engrais azotés vis à vis du taux maximum de cuivre au niveau de la plante, et que l'utilisation de fortes doses d'azote est le plus souvent néfaste. Par contre, les conséquences d'une bonne fertilisation azotée sont favorables dans le cas où des toxicités molybdiques sont à craindre.

c.3 - La fertilisation phosphorique

Les engrais phosphatés peuvent, lorsqu'ils sont employés seuls, avoir un effet dépressif sur les teneurs en cuivre des fourrages (163). En toutes conditions, cet effet reste de faible amplitude (150).

Il semble au contraire, qu'employé avec l'azote, l'acide phosphorique ait une action bénéfique et puisse augmenter les taux de cuivre de 50 p 100 (163).

En fait, les situations sont très variables suivant les sols ; en particulier, sur sol pauvre d'altitude en cours de remise en valeur, la fertilisation azote-phosphore rend la fétuque élevée plus pauvre de 15 à 18 p 100 que dans le témoin peu productif (148).

TABLEAU XXXVII : Influence de la fumure phosphatée sur les teneurs en Cuivre
Essais SNST 1969 F. de Montard et S. Périgaud 1975

Lieu	Formule NPK	Cuivre	Observations
St Bonnet de Cantal	100 - 0 - 100	7,4	Sol brun sur basal-
foin de 1ère coupe			te pH 5,2
	100 - 100 - 100		
	scories	6,6	
	Super	6,8	
	Ph. Nat.	6,7	
Cheylade (15)	0 - 100 - 100	4,7	*moyennes de 3 mo-
foins de 1ère coupe	super	4,3	des d'apport de
	Ph. Nat	4,1	PK
	Mode d'apport PK		*sol brun sur ba-
	0 - 100 - 100	4,1	salte pH 6,3
	0 - 300/3ans - 100	4,3	*moyennes de 3 for-
	0 - 100 - 0	4,7	mes de phosphore
Agonges (03)	60 - 0 - 100	5,5	Colluvions arène
moy. 1ère et 2ème coupe	60 - 100 - 100		granitique et mar-
	scories	6,1	nes pH 7,3
	Super	5,9	
	Ph. Nat	5,6	
Pontgibaud (63)	0 - 0 - 0	5,9**	Arène granitique
1ères coupes	0 - 120 - 0	6,8	(moyenne de 4 sites)
	Ph. Nat	6,3*	

Sur les prairies naturelles et sur différents sols (Tableau XXXVII) l'effet des fumures phosphatées sur les teneurs en cuivre est nul ou faible (142). Il peut être favorable (cas des arènes granitiques de Pontgibaud) ou néfaste (cas des sols bruns sur basalte de St Bonnet). Contrairement à ce qui a été signalé parfois, les scories qui apportent 20 à 200 ppm Cu, n'ont pas d'effet plus favorable que les autres formes de phosphore (Tableau XXXVII), probablement à cause du pouvoir absorbant du sol (150).

Notons aussi que la méthode d'apport du phosphore, par 300 unités par hectare pour 3 ans ou par 100 unités par hectare et par an n'a aucune conséquence (142).

Le phosphore exerce vis à vis de la plante une action synergique sur le molybdène, mais dans le sol, son influence est faible et irrégulière (85).

Combiné avec le chaulage cependant, l'acide phosphorique augmente dangereusement les teneurs et l'assimilabilité du molybdène sur sol riche, et l'apparition d'hypocuprosis peut être liée à l'utilisation de simples scories (143).

c.4 - La fertilisation potassique

La fertilisation potassique ou phospho-potassique ne semble pas intervenir directement sur les teneurs en cuivre des fourrages (142, 146).

Toutefois, la potasse tend à favoriser les légumineuses dans les prairies complexes, et peut ainsi améliorer légèrement la composition en cuivre du fourrage global (147).

c.5 - L'irrigation

Elle peut avoir les mêmes conséquences qu'une forte fertilisation azotée, d'abord un enrichissement relatif en cuivre des premières coupes puis un appauvrissement marqué des dernières (146).

Les résultats d'un essai en provenance de Dijon sont très significatifs en ce sens (Tableau XXXVIII) : si le témoin

et la parcelle irriguée à évapotranspiration potentielle ne se différencient pas en première coupe (pour laquelle l'apport d'eau est encore faible), la seconde coupe irriguée commence à être plus pauvre que le témoin et la différence s'accroît (8,0 contre 9,7 ppm) dans la dernière coupe d'octobre ; les forts rendements d'été sous irrigation ont considérablement augmenté les exportations de cuivre.

d - Fertilisation en oligo-éléments

Les graminées fourragères sont peu sensibles aux carences en oligoéléments : dans les sols français les moins bien pourvus en cuivre qui provoquent des carences graves sur céréales (41), on n'observe que rarement des symptômes sur ray grass d'Italie et fléole ; il n'y a qu'exceptionnellement déficit de rendement. On signale par contre des carences en cuivre nettes sur le trèfle violet, accessoirement sur la luzerne, des carences en molybdène sur la luzerne.

En conséquence, si l'on excepte le cas du molybdène et accessoirement du cuivre sur certaines légumineuses, nous n'avons pas affaire en France à de véritables carences végétales. C'est ce qui explique que l'emploi des fertilisants en oligoéléments ne soit pas répandu en vue d'une amélioration des rendements.

d.1 - Cuivre

Comme beaucoup de prairies ont des teneurs inférieures aux seuils de carence animale, c'est sous un aspect possibilité d'enrichissement au-delà du seuil animal que la fertilisation en cuivre est à envisager surtout ; nous l'étudierons donc plus en détail dans le chapitre prophylaxie.

d.2 - Molybdène

Le cas du molybdène est particulier. Le seuil de carence pour le végétal est sensiblement le même que le seuil de carence animal soit 0,1 ppm/MS (XV). Il est un peu plus élevé

TABLEAU XXXIX : Enrichissement en Molybdène du Ray Grass (ppm/MS)
Coppinet et Périgaud 1975

Molybdate de Sodium	1° coupe mai-juin	2° coupe juin-juil.	3° coupe Août	4° coupe Octobre
Témoin (couverture Labour	1,1 0,9	2,0 1,0	2,95 1,45	3,90 1,05
2 kg/ha (couverture Labour	5,0 1,65	12,8 2,2	12,6 2,65	16,8 2,25
4 kg/ha (couverture Labour	9,2 2,95	26,4 3,0	18,6 4,45	28,3 3,8
8 kg/ha (couverture Labour	18,7 3,8	56,2 5,0	41,6 6,4	62,8 5,4

pour la luzerne ce qui explique que des baisses de rendement soient observées sur cette légumineuse (163), le molybdène favorisant la fixation de l'azote par les bactéries du sol. Par suite, la fertilisation molybdique est d'une pratique de plus en plus courante. Le molybdène n'étant pas très fortement retenu par les constituants du sol et étant bien assimilé par la plante, il nous faut donc envisager les conséquences des différents modes d'apport sur l'éventuelle apparition de toxicité au niveau animal.

Des essais menés par l'INRA à Quimper sur ray grass d'Italie (graminée réagissant moins que les légumineuses) étudient l'influence des doses de 2, 4 et 8 kg/ha d'un molybdate, apporté au sol de deux façons : enfoui par labour avant semis, ou par les façons superficielles (Tableau XXXIX) ; la plus faible dose de 2 kg/ha (utilisée couramment dans la fertilisation) mise en couverture, élève déjà la teneur des récoltes au stade pâture jusqu'à 5 ppm au printemps et 16 ppm en octobre. Par enfouissement au labour il faut 8 kg/ha pour porter la teneur à 5 ppm (43). Dans ce cas, des toxicités molybdiques peuvent se produire, surtout sur les sols argilo-calcaires (148). Les excès de molybdène peuvent être limités sur certains sols, par l'apport avec le molybdate d'un élément antagoniste, le soufre (96).

Le traitement direct des semences de luzerne par 50 g de molybdène sous forme de molybdate d'ammonium pour 22 kg de graine /ha, semble pouvoir remplacer avantageusement celui du sol : à Theix le premier cycle contient 0,95 mg Mo/kg MS contre 0,21 dans le témoin (43). De telles pratiques sont largement utilisées en URSS, mais des essais complémentaires sur différents sols doivent être entrepris en France.

Signalons aussi pour terminer que les apports par pulvérisations foliaires avec 25 et 75 g Mo/ha conduisent à des enrichissements trop élevés pour être développés en pratique (43).

Par conséquent de telles méthodes sont à employer avec précautions (surtout l'apport en couverture) et des analyses de fourrages sont à conseiller avant sa distribution aux animaux.

TABLEAU XL : Influence des différents facteurs intervenant sur la composition en
Cu - Mo des espèces fourragères Ecarta maxima observées en France
(1968-1974)
S. Périgaud et M. Coppenet 1975

	Cu	Mo
Ecarta maxima dus à :		
- site (sol + climat)	1 - 2,0	1 - 10,0
- espèce fourragère	1 - 2,5	1 - 9,0
- variété	1 - 1,4	1 - 1,8
- année	1 - 1,2	1 - 2,2
Ecarta maxima entre les facteurs de multiplication de la référence (1) de :		
- stade : herbe → floraison	0,35 - 0,43	0,30 - 0,80
- N° de cycle : 1er → dernier	1,1 - 3,2	3 - 4
- amendements : Ca → + Ca (2)	0,8 - 1,0	1 - 2
- azote : - N → + n (2)	0,7 - 3,0	0,1 - 2,6
- phosphore : 0-P ₂ O ₅ → + P ₂ O ₅	0,9 - 1,0	0,7 - 2,0
(1) la référence est le stade herbacé, ou le 1er cycle, ou le témoin sans azote		
(2) pour ces 2 rubriques, il a été tenu compte des résultats ob- tenus à la fois sur espèces pures et sur prairies naturelles		

6 - Conclusions

Les conclusions de cette étude du cuivre dans les fourrages sont doubles :

a - Importance relative des différents facteurs

Les nombreux facteurs envisagés précédemment n'ont pas tous la même incidence sur les teneurs en cuivre et molybdène des fourrages (Tableau XL).

Ainsi pour le cuivre, et sur espèces pures, le stade et le numéro de cycle interviennent au plus haut point. La fumure azotée peut dans certains cas, avoir une influence du même ordre. L'espèce est également plus importante que le site (complexe sol-climat). La variété, l'année ont un effet plus discret. Les amendements calcaires arrivent en dernière position avec les fertilisations aux scories et phospho-potassiques (152).

Pour le molybdène les taux sont sous la dépendance étroite du sol et de l'espèce et à un degré moindre de la fumure azotée.

Dans le cas des prairies naturelles l'ordre est un peu modifié : les facteurs d'environnement (site et saison) arrivent en tête suivis de près par le stade de récolte. La dose d'azote et l'année ont des effets assez modestes, mais l'influence de l'année est certainement sous estimée car les essais sont trop courts (2 à 4 ans). Le chaulage se place en avant dernière position devant l'apport de gypse et la fertilisation aux scories (142).

b - Conséquences de l'intensification fourragère sur l'alimentation animale

L'intensification de la production animale reste encore souvent subordonnée à celle de la production fourragère qui fait appel à des techniques d'exploitation et de fertilisation très poussées. Celles-ci ont des conséquences non seulement sur les rendements, mais aussi sur la qualité de l'herbe :

c'est en fonction des besoins des animaux que l'on doit apprécier cette qualité.

L'intensification fourragère est obtenue, d'une part par la culture d'espèces sélectionnées hautement productives, d'autre part par des techniques culturales appropriées et notamment une bonne fertilisation :

- le remplacement des prairies naturelles complexes par des prairies monospécifiques de graminées a des conséquences importantes : la part des dicotylédones (légumineuses et plantes diverses) plus riches en cuivre se réduit de plus en plus ; certaines espèces de graminées sont particulièrement pauvres en cuivre ; par suite l'installation de soles de graminées pures n'est pas sans danger, et une attention particulière devrait être portée aux choix des espèces.

- l'augmentation considérable des rendements en matière sèche par la fertilisation, l'irrigation, modifie les équilibres biologiques : en particulier l'apport doit être raisonné en fonction du sol, au risque de diminuer grandement la qualité minérale du fourrage sous des doses excessives.

L'intensification fourragère peut donc contribuer à l'apparition de carence en cuivre dans des pays où elle était resté longtemps ignorée, tels que la France, en déterminant un appauvrissement des fourrages.

B - LE CUIVRE DANS LES ALIMENTS COMPLEMENTAIRES

=====

L'alimentation des ruminants, si elle repose encore largement sur l'emploi des fourrages, fait intervenir aussi diverses catégories de produits servant à augmenter les apports en énergie, en azote digestible, et entrant pour une large part dans les rationnements. Il est donc important de connaître leur composition en cuivre et molybdène afin d'évaluer les répercussions possibles sur le niveau général de la ration.

Malheureusement les oligoéléments sont trop souvent oubliés dans les analyses de ces composés et la liste est incomplète (Tableau XLI).

Les grains de céréales ont des teneurs assez faible en cuivre. Les tourteaux, malgré une assez grande diversité suivant les espèces, sont riches en cet élément mais ne suffisent pas à remonter le niveau général de la ration. Les luzernes deshydratées ont une teneur assez faible. Par contre les drèches et surtout les levures de distillerie sont à employer avec précaution dans l'alimentation des ovins en raison de leur richesse en cuivre.

Aucun taux de molybdène n'apparaît anormal.

Les pailles, utilisées quelquefois avec les foin en période de sécheresse sont très pauvres dans l'ensemble et leur emploi doit obligatoirement être associé à une complémentation appropriée (118).

Il est à remarquer, cependant, que l'origine géographique de tels aliments joue un rôle prépondérant. Dans de nombreux pays en effet, les grains et plus encore leurs sous-produits, les tourteaux sont susceptibles d'être relativement riches en cuivre (XVI, 186) ; les céréales (orge principalement) très pauvres en molybdène (XVI, 189). Or ces ingrédients représentent une large part des rations concentrées industrielles destinées à des agneaux en croissance élevés intensivement. Il est donc important de surveiller étroitement les teneurs en cuivre (et molybdène) de ces composés afin de ne pas risquer des intoxications.

TABLEAU XLI : Composition en Cu - Mo de quelques aliments complémentaires pour
ruminants (mg/kg MS)
M. Lamanç Bellanger, Tressol 1976

Aliment complémentaire	Cuivre		Molybdène	
	Moyennes	Extrêmes	Moyennes	Extrêmes
Grains : Avoine	3,5	2,7-4,9	0,7	0,2-1,3
Blé	4,4	3,2-5,2	0,3	0,1-0,5
Feverolle	13,8	11-15	1,0	0,6-1,2
Maïs	2,3	1,7-3,4	0,3	0,09-0,7
Pois	7,2		1,1	
Orge	4,1	2,6-5,5	0,3	0,1-0,5
Seigle	4,5		0,2	
Luzerne déshydratée	4,6	4,2-5,5	0,6	0,2-2
Pulpes de Betteraves	4,6	4,2-5,2	0,3	0,1-0,4
Feuilles et collet		2,5-6,0		
Racines		6,7-8,5		
Tourteaux arachide	14,5	14,3-14,7	1,7	1,3-2,1
colza	5,5	5,2-5,9	0,5	0,3-0,7
lin	21,0	20,9-21,1	0,6	0,3-0,8
soja	17,1	15-19	2,3	1,3-3,2
tournesol	29,1	24-32	0,9	0,7-1,1
Drèches	22,2	21,3-23,2	0,5	0,48-0,52
Farine de viande	9,1		0,4	
Levure de distillerie	79,0		0,4	
Son	11,7		0,6	
Pailles Blé (03)	2,7		0,30	
Blé (18)	2,1		0,25	
Orge (03)	3,7		0,43	
Orge (18)	2,3		0,28	
Orge (63)	4,7		0,55	

C - CAS DU LAIT

=====

Les jeunes, avant le sevrage, sont dépendants, pour leur alimentation en oligoéléments, d'un seul aliment : le lait maternel ou l'aliment d'allaitement.

Ils peuvent également pour certains éléments (Fe - Cu - Vit B12 - iode et sélénium) utiliser des réserves hépatiques susceptibles de pallier un certain déficit du lait (107). Ces réserves sont fonction du niveau de nutrition de la mère pendant la gestation ce qui souligne l'importance de la complémentation en oligoéléments sur les femelles gestantes ; même si la production de lait est faible ou nulle cette complémentation doit être poursuivie jusqu'à la parturition (107).

Contrairement à ce que l'on pense souvent, le lait n'est pas parfaitement adapté aux besoins du jeune.

Ainsi pour certains oligoéléments, non seulement les teneurs sont fonction du niveau de nutrition de la mère, mais en plus elles restent souvent insuffisantes, même avec une supplémentation minérale correctement ajustée (77). C'est le cas du cuivre en particulier (Tableau XLII). Le lait étant très pauvre en cuivre, la période d'allaitement est surmontée par le jeune grâce à ses réserves hépatiques. Mais de temps en temps il apparaît des accidents de carence : ce sont d'ailleurs surtout des polycarences qui se dessinent sur les jeunes (Cu, Co et Zn) (120). Certains cas d'anémie rebelle aux injections de fer sont traitées avec succès par l'addition au lait de 5 mg Cu/kg MS (107).

L'alimentation lactée des jeunes ruminants doit donc être surveillée de près, sinon des carences graves risquent de survenir.

Les aliments d'allaitement doivent être corrigés quant à leur composition en oligoéléments et ce d'autant plus qu'ils sont à base de lait en poudre.

TABLEAU XLII : Teneur en Cu - Mo du lait

:	:	:	:	:	:
:	:	Vache	:	Brebis	:
:	:	<u>µg/litre</u>	<u>mg/kg MS</u>	<u>µg/litre</u>	<u>mg/kg MS</u>
:	:	:	:	:	:
:	Cuivre	20-150	0,15-1,15	150-200	0,9-1,2
:	Molybdène	50- 80	0,4 -0,6	30- 50	0,18-1,3
:	:	:	:	:	:

Conclusion

L'analyse de l'alimentation des ruminants nous montre que, dans de très nombreux cas, les teneurs en cuivre de la ration sont insuffisantes et ceci d'autant plus que l'intensification fourragère, mal conduite ou irraisonnée, pénètre le milieu agricole. Même les ensilages (maïs, ray grass ...) s'ils s'avèrent meilleurs que les foins n'apportent pas suffisamment de cuivre ; or ils sont largement distribués de nos jours.

La connaissance des nombreux facteurs intervenant sur les taux cupriques des fourrages permet une évaluation de la teneur en cuivre de la ration offerte à l'animal. Elle peut donc, non seulement orienter les recherches en cas de problème dans un élevage, mais aussi contribuer à supprimer des analyses coûteuses pour l'éleveur.

Les conséquences sur l'animal, si elles sont peu spectaculaires et difficile à déceler, n'en sont pas moins importantes.

III - LE CUIVRE CHEZ LE RUMINANT

L'animal constitue le dernier maillon de la chaîne sol- plante - animal et, bien entendu, le plus important pour le praticien et pour l'éleveur.

Nous avons vu que les déséquilibres minéraux, tant au niveau du sol que de la plante, pouvaient avoir des répercussions plus ou moins graves sur l'animal. Nous allons maintenant préciser le devenir et le rôle biologique du cuivre dans l'organisme, cerner les besoins et envisager les conséquences cliniques de la carence ou de l'excès sur le ruminant. Le délicat problème du diagnostic sera abordé avant les conséquences économiques.

A - DIGESTIBILITE - RETENTION

=====

1 - Rappel de définitions

En alimentation tout apport de matière nutritive se traduit par des paramètres d'efficacité : digestibilité et rétention. Les oligoéléments n'échappent à pas à cette règle.

La digestibilité des oligoéléments implique une notion de rendement dans l'absorption des minéraux offerts dans l'alimentation.

En effet une certaine quantité est ingérée avec la ration. Mais seule une fraction de cet ingéré est absorbée, l'autre indigestible suit les matières fécales ; parmi la fraction absorbée une partie seulement est réellement utilisée dans le métabolisme tandis que l'autre est excrétée dans l'intestin (sécretions digestives, desquamation, pertes de solutions dans la lumière intestinale) et dans l'urine.

L'indigestible et l'excrétion intestinale d'origine endogène constituent l'excrétion fécale.

Contrairement à l'iode et au sélénium l'excrétion du cuivre dans le lait est faible (XV).

- Digestibilité apparente :

$$\text{CUDa} = \frac{Q \text{ ingérée} - Q \text{ fécale}}{Q \text{ ingérée}} \text{ en p.100}$$

Cette digestibilité apparente ne tient pas compte de l'excrétion urinaire contrairement à la digestibilité vraie.

- Digestibilité vraie :

$$\text{CUDr} = \frac{Q \text{ ingérée} - (Q \text{ fécale} + Q \text{ urinaire})}{Q \text{ ingérée}} \text{ en p.100}$$

La rétention représente une quantité et est exprimée en mg/100 kg de poids vif.

- Rétention = $Q \text{ ingérée} - (Q \text{ fécale} + Q \text{ urinaire})$

Pour les oligoéléments l'excrétion urinaire peut être considérée comme négligeable donc : $\text{CUDa} = \text{CUDr}$ (111).

Si les animaux ont une excrétion fécale supérieure à l'ingéré, la digestibilité et la rétention sont négatives : la carence apparaîtra plus ou moins rapidement (111, 114).

2 - Digestibilité du cuivre

a - Mesure

Une des méthodes de mesure, la plus employée, est la méthode des bilans. Mais en raison des doses très faibles mesurées, la difficulté réside surtout dans l'exclusion totale des contaminations extérieures.

Les animaux sont placés dans des cages à métabolisme en plastique ou plexiglass, les abreuvoirs sont en plastique (7). Les quantités d'aliment ingérées et d'eau absorbée sont enregistrées ainsi que leurs teneurs respectives en cuivre. Après trois semaines d'adaptation les fécès sont recueillis en sac plastique et le cuivre dosé par spectrométrie d'absorption atomique (17) ; les urines sont recueillies séparément. Par le calcul on en déduit la digestibilité apparente et la rétention.

Cette méthode peut être améliorée par des injections

de cuivre radioactif (Cu 64) directement dans le rumen et dans la veine jugulaire (5).

b - Résultats

Les valeurs obtenues pour la digestibilité du cuivre sont très variables d'une expérience à l'autre, en raison des nombreux facteurs interférents. Il est donc très difficile de donner un élément de référence, la gamme de variation allant de - 10 à 50 p.100 environ.

Une série de bilans réalisés sur moutons en croissance (114) nous donne des valeurs allant de 16,7 p.100 pour la luzerne hachée, 10,0 p.100 pour l'herbe fraîche, - 1,5 p.100 pour l'ensilage seul à -3,7 p.100 pour un foin de ray grass. Sur des agneaux, l'ensilage de maïs enrichi avec 15 g d'urée/kg MS a donné des valeurs de 21 à 27,3 p.100 (106). Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles obtenues précédemment sur des agneaux après sevrage par Suttle (180).

Retenons donc que la digestibilité des oligoéléments en général et du cuivre en particulier est très faible : de 0 à 10 p.100 le plus souvent pour les adultes et de 10 à 30 p.100 pour les animaux en régime lacté ou en croissance (111, XIV). Ces valeurs très inférieures à celles des autres nutriments, s'expliquent par une excrétion fécale endogène particulièrement élevée dans le cas des oligoéléments.

2 - Facteurs de variation de la digestibilité et de la rétention du cuivre

a - La teneur de la ration

Le métabolisme minéral est habituellement réglé par une loi assez générale (111) :

- si la teneur de la ration s'élève, la digestibilité diminue et la rétention augmente. Au-delà d'un certain seuil de toxicité, la digestibilité est à un palier minimum, les organes de stockage sont saturés ainsi que les voies d'excrétion : l'intoxication apparaît.

TABLEAU XLIII : Influence de la qualité du fourrage sur la digestibilité et
la rétention du Cuivre

Lamand 1978

Ration	Teneur Cu : mg/kg MS	Digestib. : %	Rétention : mg/100 kg PV
Herbe congelée	4,5	10,0 **	1,23 **
Foin pailleux	5,3	- 3,7	- 0,38

- si la teneur de la ration diminue la digestibilité augmente et la rétention diminue. En deçà du seuil de carence, l'absorption intestinale est à un palier maximum, la rétention ne couvre plus l'excrétion endogène minimum ; la balance métabolique est déficitaire et l'animal perd plus de minéral qu'il n'en ingère : la carence apparaît.

Si cette loi se vérifie avec le manganèse et le sélénium, la relation entre la teneur de l'aliment et la rétention est faible ou nulle pour le cuivre et le zinc : la qualité de la ration influe davantage que sa teneur (5, 111, 114).

b - Influence de la qualité de la ration

b.1 - La digestibilité du fourrage

La digestibilité et la rétention du cuivre sont étroitement liées à la digestibilité de la ration (digestibilité de la matière sèche, de la matière organique etc...).

Des bilans réalisés sur des agneaux en croissance le montrent (114) : un ray grass italien de premier cycle au stade début épiaison a été en partie récolté et congelé en vert, en partie séché sur le pré en 5 semaines pendant une période pluvieuse ; le foin produit était pailleux mais non moisí. Malgré des teneurs voisines en cuivre, la digestibilité et la rétention sont nettement abaissées dans le foin par rapport à l'herbe (Tableau XLIII).

b.2 - Influence de la présentation physique de l'aliment

Vitesse de Transit

Nous savons que les aliments broyés et agglomérés en bouchons transitent plus rapidement dans le tube digestif que des aliments offerts sous forme longue.

Pour apprécier les effets sur la digestibilité du cuivre, deux formes de luzerne ont été offertes à des moutons en croissance (7) : une forme hâchée en brins de 3 cm environ, une forme broyée à la grille et agglomérée en bouchons de 6 mm de diamètre. L'augmentation de la vitesse de transit provoque

TABLEAU XLIV : Influence de la vitesse de transit sur la digestibilité et la rétention en Cu
Lamand 1978 - Amboulou, Lamand et Rayssiguier 1977

Régime	Teneur Cu : mg.kg MS	Digestib. %	Rétention mg/100 kg PV	Temps de séjour : dans le TD (h)
foin luzerne haché 3 cm de long	8,42	16,71	4,87	52 - 54
foin luzerne broyé condensé	8,57	6,4	2,6	38 - 41
comparaison luzerne longue/broyée		38 %	53,4 %	

une diminution de la digestibilité et de la rétention du cuivre (Tableau XLIV). Ces baisses de digestibilité et de rétention sont dues à une réduction de l'absorption intestinale observée parallèlement à une légère diminution de l'excrétion fécale endogène (6).

Cette influence néfaste de la vitesse de transit explique en partie la mauvaise efficacité du cuivre de l'herbe jeune (70), et certains accidents de carence observés sur des animaux engraisés à long terme avec des aliments broyés et condensés (114).

b.3 - Les contaminations par la terre

Ces contaminations accidentelles amènent des oligo-éléments en quantité non négligeable. Mais, malgré cet apport en cuivre, la digestibilité et la rétention de cet élément sont significativement abaissées sur des moutons en croissance pour un ensilage de maïs contaminé par 5 p.100 de terre (Tableau XLV). Des précautions doivent donc être prises lors du tassement des silos au tracteur.

Cependant l'influence de la terre sur le cuivre n'est pas toujours aussi constante, et dans certains cas les oligo-éléments apportés sont retenus (108).

b.4 - Influence du cycle de végétation

Différents auteurs (70, 81) signalent la faible digestibilité du cuivre dans l'herbe jeune, pourtant bien pourvue en cet élément, par rapport à des foin de moindre qualité. Des complémentations sont donc nécessaires pour atteindre des performances zootechniques optima sur des animaux pâturent une telle herbe (70).

Les variations de la digestibilité du cuivre au cours du premier cycle de végétation ont été étudiées sur des moutons adultes mâles (6).

Les résultats montrent que la digestibilité et la rétention varient en fonction du stade de développement et ceci

TABLEAU XLV : Influence de la terre sur la digestibilité et la rétention du Cu
Lamand 1978

Régime	Teneur Cu : mg/kg MS	Digestibilité : %	Rétention : mg/100 kg PV
Ensilage seul	4,0	- 1,5	- 0,1
Ensilage + 5 % terre	4,8	- 10,6	- 1,1

indépendamment des teneurs en cuivre. Les valeurs maximum se situent au début de la montaison et à la fin de l'épiaison. Mais, au moment où l'herbe est la plus digestible, c'est-à-dire au stade feuillu, le cuivre, malgré une teneur élevée dans la plante, n'est pas plus digestible qu'en fin de premier cycle (fourrage pailleux de qualité médiocre). Cette digestibilité très basse du cuivre dans l'herbe feuillue suggère l'influence dépressive de facteurs spécifiques à l'herbe jeune.

La haute teneur en eau de cette forme d'aliment contribue à une accélération du transit intestinal ; et cet effet laxatif conduit à une évacuation supplémentaire de cuivre par les matières fécales (70). Mais cet effet mécanique ne suffit pas à expliquer la faible digestibilité du cuivre de l'herbe jeune.

Frens (70) pense que la structure physique de cette herbe tendre aboutit à un tassement au niveau du rumen, et par suite perturbe l'activité microbienne optimale de la flore.

Hartman et Bosman (81) ont observé une chute rapide des teneurs en cuivre hépatique, parallèlement à de hautes concentrations en sulfures dans le rumen. Ces auteurs ont montré qu'un excès de matières azotées par rapport à l'énergie provoquait un gaspillage des acides aminés soufrés par la flore du rumen, ce qui aboutit à la libération de sulfures en grande quantité ; la formation de sulfure de cuivre insoluble diminue fortement l'assimilabilité de cet oligoélément (176). La haute digestibilité de l'herbe jeune, conduit à une forte dégradation dans le rumen et agit comme un facteur aggravant (81).

Notons aussi qu'un régime hyperprotéique diminue fortement la digestibilité du cuivre, par le même "effet sulfure".

B - METABOLISME ET BIOCHIMIE

=====

1 - Métabolisme

a - Absorption

a.1 - Le site d'absorption du cuivre dans le tractus digestif n'est pas très bien défini. Les études réalisées portent sur les chiens, les porcs, les poulets, l'homme et surtout les rats.

Le niveau maximum d'absorption chez le rat se situe dans le duodénum et la partie antérieure du jéjunum (195), c'est-à-dire dans les zones les plus acides de l'intestin (192). Le jéjunum, en raison de sa grande longueur, représente en fait la zone principale d'absorption du cuivre quand les apports sont suffisants.

a.2 - Les mécanismes mis en jeu ne sont pas connus avec précision. Seules des hypothèses sont avancées. Il semble que l'absorption intestinale soit réalisée suivant deux modalités (195) :

- quand les concentrations en cuivre dans le tractus digestif sont basses l'absorption fait appel à un mécanisme actif : la capture du cuivre par les cellules de la muqueuse se ferait au moyen d'une liaison chimique, soit en surface, soit à l'intérieur de la cellule ; le transport jusqu'aux cellules de la séreuse s'effectuerait par un ou plusieurs mécanismes dépendants de l'énergie métabolique (44).

- Quand le taux de cuivre augmente dans l'intestin, l'absorption tend à devenir proportionnelle à la concentration ; le mécanisme actif est dépassé par un phénomène de simple diffusion (195).

Durant les processus d'absorption le cuivre se fixe sur certaines "molécules de liaison". Ces composés auraient un rôle de transporteur et (ou) de régulateur (63).

L'une de ces molécules a été isolée chez le rat : il s'agit d'une protéine de haut poids moléculaire dont l'identité et la fonction ne sont pas précisées (63).

Starcher (177) a découvert chez le poulet une protéine d'un poids moléculaire d'environ 10.000, fermement et spécifiquement attachée au cuivre.

Chez les bovins une autre protéine riche en cystine, la métallothionéine, a été mise en jeu dans l'absorption intestinale du cuivre (63). Cette protéine à affinité métallique, présente dans le cytoplasme des cellules intestinales, pourrait régler la quantité de cuivre qui passe dans le sang.

Pour le cuivre on ne connaît pas de mécanisme de régulation de l'absorption comparable à celui du fer. Lorsque le taux de cuivre alimentaire diminue le cuivre tissulaire suit ; quand le cuivre de la ration augmente les taux de cuivre dans les tissus s'élèvent (46). Mais il n'existe aucune preuve qui indique si oui ou non l'absorption est ajustée en fonction des besoins. Certains auteurs pensent que l'homéostasie du cuivre est réalisée par l'excrétion plutôt que par l'absorption.

D'autres (44, 195) pensent qu'au contraire il se produit une régulation de l'absorption, au moins pour de faibles concentrations en cuivre dans le tractus digestif.

a.3 - Facteurs de variation de l'absorption

Bien que les mécanismes intimes de l'absorption du cuivre demeurent obscurs, un certain nombre de facteurs, en dehors de la teneur en cuivre de la ration, modifie souvent profondément ce processus.

a.3.1 - La forme du cuivre ingéré :

- Pour les formes minérales, aussi bien sur les ovins que sur les bovins, l'absorption est maximum pour le carbonate ; les composés solubles (nitrate, sulfate) sont plus digestibles que le chlorure et les oxydes ; le cuivre métallique est très mal assimilé (34, 121). Les résultats obtenus en France sur des ovins (113) confirment ces données : le cuivre de l'oxyde est environ trois fois moins digestible que celui du sulfate (5,8 contre 15 p.100).

- Dans les végétaux le cuivre existe sous la forme de nombreux complexes organiques naturels stables (essentiellement neutres ou anioniques) (135). Mills (135) a montré que le cuivre de ces complexes est plus digestible que celui du sulfate. Il en conclut que le passage du cuivre à travers la muqueuse intestinale pourrait bien s'effectuer sous la forme de tels complexes.

Cette notion de complexe métallique prend toute son importance quand on considère le cuivre de la ration et son devenir dans le tube digestif lorsqu'il se trouve mélangé aux différents nutriments (103). Le cuivre soluble, apporté par les aliments, peut se combiner avec les nombreux polymères présents dans la lumière intestinale (protéines essentiellement) et former ainsi des complexes macromoléculaires ; ceux-ci sont d'autant moins bien absorbés qu'ils sont volumineux et stables (102). Par contre, sous la forme de petits chélates, le cuivre est bien mieux absorbé car il ne peut être déplacé par les agents complexants plus encombrants (103). Fixé sur des acides aminés purs, le cuivre est plus ou moins bien absorbé suivant le type, la configuration et le degré de polymérisation de ces acides aminés (102). De même, les phytates, présents dans les protéines de soja, peuvent donner naissance à des complexes cuivriques stables et très mal assimilés (195). Mais ce phénomène est peu important chez les ruminants car les phytates sont dégradés par la microflore du rumen (182).

a.3.2 - Eléments interférents :

- Le calcium diminue l'absorption du cuivre (192). Kirchgessner (100) a montré sur des ruminants que, avec la même teneur en cuivre (7 à 8 ppm), la rétention passe de 40 p.100 à une valeur négative lorsque le calcium de la ration passe de 6 g/kg à 8 g/kg ; même avec des taux de cuivre de 15 ppm la rétention est négative si la ration contient 11 g de calcium par kilo.

Wezer et Kirchgessner (103) expliquent cette forte diminution de la rétention du cuivre par une augmentation du pH intestinal. Le milieu du rumen est relativement peu acide et

une faible quantité de calcium est susceptible d'augmenter le pH intestinal ; le cuivre précipite alors sous forme d'hydroxyde mal absorbé.

Cependant le calcium des plantes ne semble pas interférer (Tableau XLVI), cet élément majeur paraît n'intervenir que lorsqu'il est ajouté à la ration (108). Une erreur de diagnostic, lors de trouble osseux par exemple, peut donc conduire à aggraver la carence par surcharge de la ration en calcium.

- Autres éléments : de nombreux éléments tels que le zinc, le cadmium, le plomb, le molybdène (et les sulfates) modifient l'absorption du cuivre dans le tractus digestif. Mais pour certains ce n'est pas le seul niveau d'interférence avec le métabolisme du cuivre. Pour plus de clarté nous envisageons leur rôle antagoniste dans un paragraphe spécial.

b - Excrétion

La principale voie d'excrétion du cuivre est la voie fécale (XV).

Si dans la plupart des espèces l'excrétion biliaire domine (80 p.100 chez l'homme), il n'en est pas de même chez les ruminants. Dans une étude récente sur des vaches en lactation Binnerts (25) a montré que l'excrétion fécale endogène était surtout représentée par les sécrétions digestives muqueuses, principalement au niveau des estomacs et du duodénum (30 mg Cu/kg de mucus sec) ; la contribution biliaire est variable mais faible (0,3 à 0,4 mg/litre). La ceruloplasmine n'est pas un précurseur important dans cette excrétion fécale endogène ; ce rôle est tenu par la fraction labile du cuivre plasmatique.

L'excrétion urinaire du cuivre est faible (environ 4 p.100 de l'excrétion totale) même en cas de surcharge (XV, 195). De même les sorties par le lait sont réduites, 1 à 2 mg pour 10 litres en moyenne pour les ovins comme pour les bovins (77).

TABLEAU XLVI : Influence du calcium des fourrages sur la digestibilité du cuivre
Lamand 1978

	Légumineuses			Graminées		
	Teneur mg/kg MS	Digestib. %	Rétention mg/100 kg MS	Teneur mg/kg MS	Digestib. %	Rétention mg/100 kg PV
Cu	9,3 **	8,6 **	1,8	5,9	- 4,0	- 0,3
Ca	13270			4360		

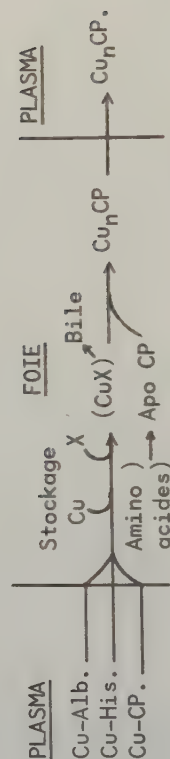


Figure 8 : Biosynthèse de la Céruleplasmine.

c - Transport

Le cuivre absorbé par l'intestin est transporté par le sang. Il le quitte rapidement pour gagner les tissus, en particulier le foie (167).

Le cuivre plasmatique est composé de deux fractions principales (XV, 74).

c.1 - Cuivre non échangeable : la céruloplasmine :

La céruloplasmine est une protéine isolée en 1944 par Holmberg et Laurell ; le cuivre qu'elle renferme représente la fraction la plus importante du cuivre plasmatique (95 p.100 environ). Cette métalloprotéine a de multiples fonctions, toutes aussi importantes les unes que les autres (73). En particulier, elle constitue un transporteur de cuivre analogue à la transferrine pour le fer (91). Mais le cuivre qu'elle renferme fait partie intégrante de la molécule et est solidement lié à la protéine ; il n'est libéré qu'au cours du renouvellement de celle-ci (168). Synthétisée dans le foie (Figure 8), c'est elle qui amène le cuivre dans les différents tissus où ou il va s'intégrer aux nombreuses cupro-enzymes et aux diverses cupro-protéines (72, 74, 91).

c.2 - Cuivre échangeable

Cette fraction labile -"direct reacting" des anglo-saxons- ne représente que 5 p.100 du cuivre plasmatique. Cette fraction est en fait composée de plusieurs chélates cuivriques : Cu (II) -albumine le premier découvert ; Cu (II) histidine (144), albumine - Cu (II) - histidine et peut être aussi des complexes ternaires avec d'autres acides aminés (74). Toutes ces formes ne constituent que des transitions entre l'absorption et le foie où elles fournissent du cuivre pour le stockage et la synthèse de céruloplasmine (72).

d - Schéma du métabolisme du cuivre

Chronologiquement, le cuivre intestinal est absorbé, il est capté par les albumines, les acides aminés sériques et gagne rapidement le foie. Là il est inclus dans la synthèse de céruloplasmine et stocké sous forme d'hépatocupréine si il y a excès.

La céruloplasmine regagne le torrent circulatoire et distribue le cuivre sous une forme stable aux différents tissus de l'organisme pour satisfaire leurs besoins vitaux.

Une faible partie de céruloplasmine s'élimine dans la bile ; le cuivre est surtout éliminé lié à diverses protéines ou à des molécules organiques variées (167).

2 - Teneurs en cuivre des tissus et liquides biologiques

a - Répartition

Il existe très peu de travaux sur les pourcentages du cuivre total dans les différents tissus chez les ruminants. Dick (56) a trouvé chez deux moutons adultes la distribution suivante : foie 72 et 79 p.100, muscles 8 et 12 p.100, peau et laine 9 p.100, squelette 2 p.100. Il faut remarquer que ces moutons étudiés avaient un cuivre hépatique très élevé, presque trois fois la teneur moyenne.

Les glandes (prostate, pituitaire, thyroïde et thymus) sont faiblement pourvues en cuivre ; la rate, le pancréas, les muscles, la peau et les os ont des teneurs intermédiaires ; le foie, le cerveau, les reins et le coeur ont des concentrations en cuivre relativement élevées (XV).

b - Teneur en cuivre du foie

Le foie est le principal organe de stockage du cuivre et il a intéressé de nombreux chercheurs.

b.1 - valeurs moyennes

Les différentes concentrations relevées sont résumées dans le Tableau XLVII. Les chiffres varient considérablement : de 3 à 1400 $\mu\text{g/g}$ MS chez les ovins et de 9 à 845 $\mu\text{g/g}$ MS chez les bovins suivant les auteurs. Ces divergences s'expliquent par les nombreux facteurs agissant sur le cuivre hépatique, en particulier le niveau du cuivre alimentaire.

Si dans la plupart des espèces le cuivre hépatique se situe entre 10 et 50 $\mu\text{g/g}$ MS, les teneurs moyennes sont plus élevées chez les ruminants avec une gamme de variation normale de 75 à 400 $\mu\text{g/g}$ MS (XV, XIV).

b.2 - Influence de l'espèce

Il n'existe pas de grandes différences entre les bovins et les ovins.

Cependant sur des animaux recevant une alimentation normale, on note une distinction entre ovins et bovins qui est fonction de l'âge : chez le fœtus ou chez le jeune, les concentrations en cuivre du foie sont plus fortes pour l'espèce bovine (46, 162, 166). Par contre à l'âge adulte la relation s'inverse les ovins ayant des teneurs supérieures aux bovins (46, 166, 174). Il s'ensuit que la gamme de variation sur des animaux normaux est plus étroite sur les bovins, du jeune âge à la maturité que sur les ovins. Notons aussi que l'extrême sensibilité des ovins aux excès de cuivre peut conduire à des valeurs élevées de l'ordre de 600 ppm assez fréquemment (78) sans conséquence sur l'animal.

b.3 - Influence de l'âge

- Pour les bovins, le cuivre hépatique est maximum chez le jeune (Tableau XLVII). D'après Pryor (162) il semble que ce maximum soit atteint très tôt pendant la gestation. Pendant la phase d'allaitement les concentrations en cuivre chutent généralement mais les quantités de cuivre hépatique augmentent (XV). Les teneurs de l'adulte sont atteintes entre 3 et 6 mois (4, 166).

TABLEAU XLVII : Teneur en cuivre du foie

	Teneur en $\mu\text{g/g MS}$	Age	Remarques	Références
	Valeurs extrêmes			
OVINS	120 - 300	Agneau	Normal	Bennetts et Chapman 1937
	4 - 8	"	Carencé	
	360	Adulte	Normal	
	3 - 4	"	Carencé	
	168 (74 - 430)	Nouveau-né	Normal	Cunningham 1946
	13 (4 - 34)	"	Carencé	
	599 (186-1374)	Adulte	Normal	
	27 (7 - 106)	"	Carencé	
	12 - 400	Agneau	Normal	Spaïs 1959
	6 - 300	Adulte	Normal	
	157 $\pm$ 15	Nouveau -né	Expérience 1	Ryley et coll. 1961
	239 $\pm$ 27	"	2	
	262 $\pm$ 24		3	
	103 $\pm$ 12,3	Mère au moment de	Expérience 1	
	134 $\pm$ 12	la mise bas	2	
	141 $\pm$ 15		3	
	266,6	Nouveau-né	Normal	
	9,6	Nouveau-né	Carencé	
	124 (44 - 310)	Foetus	Normal	Pryor 1964
	245 (21 - 751)	Mère	Normal	
BOVINS	381 (143-645)	Nouveau-né	Normal	Cunningham 1946
	55 (8 - 109)	"	Carencé	
	200 (23-409)	Adulte	Normal	
	11,5 (2,9-32)	"	Carencé	
	55 - 100	Adulte	Normal	Spaïs 1959
	361 $\pm$ 33	Veau à la naissance	Expérience 1	Ryley et coll. 1961
	329 $\pm$ 58	"	2	
	17,1 $\pm$ 2,5	Mère au moment de	Expérience 1	
	9,8 $\pm$ 1,7	la mise bas	2	
	100 - 300	Adulte	Normal	Cunha et coll.
	430	Fœtus	Normal	Pryor 1964
	164	Mère	Normal	
	407 (207 - 845)	Veau 140 jours	Normal	Anke 1966
	17,6 (13,6-20,9)		Carencé	
	7,3 (59 - 91)	Adulte	bon entretien	Bellanger 1968
	42 (31 - 56)	"	Entretien médiocre	

Chez les ovins la plupart des données s'accordent pour dire que les concentrations du cuivre hépatique sont plus faibles chez le jeune (50 - 100 ppm) que chez l'adulte (> 100 ppm) (46, 162, XV). Elles augmentent continuellement de la naissance à un âge avancé (XV). Mais en cas de subcarence ou de carence, le cuivre maternel est utilisé en priorité par le fœtus et celui-ci peut avoir un taux hépatique à la naissance plus élevé que celui de la mère (166).

b.4 - Influence de l'alimentation

Le stockage du cuivre dans le foie est fonction de nombreux facteurs alimentaires. Ces facteurs sont dans l'ensemble les plus actifs. Certains sont bien connus tels que le cuivre, le molybdène, les ions sulfates, le zinc, les protéines, d'autres moins tels le plomb, le cobalt, les cyanates, le cadmium ; enfin certains sont inconnus.

b.4.1 - Le cuivre

Le cuivre hépatique est directement fonction du cuivre de l'alimentation. Dick (56) a étudié l'accumulation de cuivre dans le foie sur des moutons recevant de 3,6 à 33,6 mg Cu/jour pendant 177 jours ; il a montré que le cuivre total du foie (en mg) était proportionnel au cuivre ingéré jusqu'à 18,6 mg/jour. Les concentrations hépatiques, parallèlement, ont augmenté de 562 à 2340 ppm/MS. De même, la supplémentation en cuivre sur des brebis carencées pendant la gestation, est efficace pour amener le cuivre hépatique du fœtus à une valeur normale (2).

En cas de carence le cuivre hépatique descend à des valeurs inférieures à 20 - 30 ppm (47, 130), il peut même tomber en dessous de 5 ppm/MS.

En cas de toxicité les valeurs atteignent des chiffres supérieurs à 800 - 1000 ppm avec des extrêmes à 2000 et 3000 ppm sur des moutons au moment de la crise hémolytique (186, XIV, XV).

b.4.2 - Les protéines

Des régimes hyperprotéiques peuvent conduire à des carences en cuivre, avec un apport suffisant en cet élément. En fait, Hartman et Bosman (81) ont montré qu'un excès des matières azotées par rapport à l'énergie provoquait une chute du cuivre hépatique, par un "effet soufre".

b.4.3 - Les cyanures et thiocyanates

D'après Spais et Coll. (175) les cyanures à la dose de 40 mg par jour réduisent les réserves hépatiques en cuivre sur les brebis et les agneaux. Mais les thiocyanates augmentent les concentrations en cuivre du foie. Aucune modification significative n'apparaît au niveau du sang.

Administrés avec des sulfates les cyanures ne modifient pas l'action du soufre (175).

Dans le cas de consommation de trèfle frais, on peut donc s'attendre à des modifications du métabolisme du cuivre. Les cyanures, de par leur effet néfaste doivent être considérés avec plus d'intérêt.

Le mode d'action est hypothétique ; les cyanures se combineraient au cuivre pour donner des cyanures de cuivre très insolubles. Avec un excès de cyanure il se formerait un complexe très soluble et bien absorbé. Les thiocyanates conduisent dans le rumen à une importante formation de cyanures ce qui solubilise une certaine quantité de cuivre et permet ainsi une meilleure absorption et un meilleur stockage hépatique (175).

b.4.4 - Le molybdène et les sulfates

Dick et Bull (58) les premiers ont montré qu'une augmentation de l'ingestion de molybdène réduisait l'accumulation de cuivre dans le foie des bovins et des ovins. Plus tard les sulfates de la ration sont apparus comme un facteur aggravant dans l'antagonisme cuivre-molybdène (54, 55) : lorsque la ration est pauvre en cuivre, la carence apparaît d'autant plus rapidement que le régime contient plus de molybdène et de

sulfates. Cunningham (48) propose comme valeur limite pour le molybdène de la ration 3 mg/kg MS si le cuivre alimentaire est faible et 10 mg/kg MS pour une teneur en cuivre normale. De nombreux auteurs cités par Pitt (157) ont signalé cette diminution de la rétention du cuivre par le foie lorsque le molybdène et les sulfates sont présents en quantité suffisante dans la ration. Mais certains chercheurs n'ont pu reproduire les symptômes de carence en cuivre en dépit d'un régime pauvre en cuivre et riche en molybdène et sulfates (32). Ils attribuent leur échec à la présence d'autres facteurs mal contrôlés dans la ration de base.

En fait, l'effet du molybdène associé aux sulfates est variable suivant la teneur en cuivre de la ration (XV). Lorsque le cuivre alimentaire est faible ou normal, le stockage hépatique est limité par des taux modérés de molybdène et de sulfates (57) (> 3 ppm Mo - $> 0,2$ p 100 sulfates).

Lorsque les teneurs en molybdène et sulfates sont très faibles ($< 0,1$ ppm S,) (0,1 ppm - 0,2 ppm Mo) même pour des valeurs modérées (15 à 20 ppm) du cuivre alimentaire, l'accumulation hépatique est renforcée et peut conduire à des toxicités chroniques sur les ovins (XV).

Pour des concentrations alimentaires très hautes en molybdène et sulfates le cuivre hépatique n'est pas modifié (157).

Les proportions en molybdène et sulfates par rapport au cuivre sont donc déterminantes pour l'effet produit sur le stockage hépatique.

b.4.5 - Le zinc, le cadmium, le cobalt

- Le zinc a un effet dépressif sur le stockage du cuivre hépatique (155, 195, XV). Mais cependant cet antagonisme semble n'avoir lieu, dans la pratique, que pour des teneurs élevées de la ration (supérieures à 200 ppm Zn) (XV, 182). Cette action peut être mise à profit pour diminuer la toxicité du cuivre chez le mouton (27).

- Lors de pollutions industrielles ou lors d'expérimentations avec des teneurs élevées (de l'ordre de 100 ppm), le cadmium agit comme un antagoniste du cuivre (155). Mills et Dalgarno (138) ont montré que des taux beaucoup plus faibles (3,5 mgCd/kg) suffisaient à abaisser notablement les teneurs en cuivre du foie sur des moutons.

- Chapman et Kidder (35) révèlent que la carence en cobalt est néfaste au stockage du cuivre hépatique sur des bovins : l'addition de 0,06 p.100 de cobalt sous forme de carbonate à la ration augmente considérablement le cuivre dans le foie.

b.4.6 - Le plomb, le fer

- Le plomb est un métal toxique susceptible de diminuer les concentrations en cuivre du foie (86, 155).

- Il existe une corrélation significative entre les concentrations hépatiques en Fer et en Cuivre : des animaux recevant un régime carencé en fer accumulent plus de cuivre dans le foie que des animaux correctement alimentés ; quand le fer hépatique augmente le cuivre diminue (35, XV).

b.5 - Influence de la gestation

En ce qui concerne les bovins Allcroft et Uvarov (2) et Pryor (162) ont démontré que le cuivre hépatique décroissait pendant la gestation. Cet abaissement commence à partir des cinquième et sixième mois (162).

Quant aux ovins plusieurs auteurs s'accordent pour reconnaître que l'effet de la gestation est nul (162, 166).

b.6 - Etat d'entretien de l'animal

D'après Bellanger (16) la teneur en cuivre du foie est en rapport hautement significatif avec l'état d'entretien de l'animal. Les bovins pléthoriques et normaux ont une teneur hépatique allant de 59 à 91 mg Cu/kg MS, alors que les animaux médiocres ou cachectiques fournissent des valeurs de 31 à 56 ppm.

En fait cette influence de l'état d'entretien n'est qu'un reflet particulier de l'alimentation, et doit être rattachée aux effets de la teneur en cuivre de la ration.

c - Teneurs en cuivre du sang

Dans le sang le cuivre existe sous plusieurs formes (XV).

Au niveau des érythrocytes le cuivre est étroitement lié à une protéine, l'hémocupréine (superoxyde dismutase) pour environ 60 p.100 et plus faiblement à différentes protéines non identifiées pour le reste (74). Dans le plasma le cuivre lié à la céruloplasmine représente la majeure partie (95 p.100 environ), tandis que le cuivre labile chélaté avec les albumines et différents acides aminés ne représente qu'une faible part. Il est à remarquer que la concentration en cuivre dans le plasma est un peu supérieure à la concentration dans les hématies.

c.1 - Valeurs normales

Les teneurs normales trouvées pour les bovins et les ovins par différents chercheurs sont mentionnées dans le tableau XLVIII. Elles se situent en moyenne pour les deux espèces, aux alentours de 100 $\mu\text{g}/100\text{ ml}$ (46) avec une plage de variation de 80 à 120 $\mu\text{g}/100\text{ ml}$ (XIV, XV). Il existe cependant des différences significatives entre races chez les moutons (198) et les bovins.

c.2 - Influence de l'alimentation

c.2.1 - Le cuivre

La cuprémie est modifiée par le taux de cuivre de la ration. En cas de carence le cuivre sanguin s'abaisse à des teneurs inférieures à 70 $\mu\text{g}/100\text{ ml}$ (1, 130) et peut même atteindre 10 $\mu\text{g}/100\text{ ml}$ sur des ovins et des bovins paturant des herbages très carencés (XV).

TABLEAU XLVIII : Teneur en Cuivre du sang

Espèce	Teneur en $\mu\text{g}/100 \text{ ml}$ valeurs extrêmes	Age	Remarques	Références
OVINS	127 et 146	Adulte	Normal	Innes et Shearer 1940
	45	Adulte	fermes à swayback (agneaux normaux)	
	58	Adulte	Brebis dont les agneaux sont ataxiques	
	117	Agneau	Normal	
	55	"	Ataxique	Cunningham 1946
	91	Adulte	Normal	
	37	"	Carencé	
	100	Adulte	Normal	Allcroft 1952
	10 - 60	"	Brebis dont les agneaux sont ataxiques	
	32 - 150	Adulte	Normal	Spaïs 1959
	5 - 20	Agneau	Ataxique	
	121	Adulte	Normal	Karcher 1962
	104	Agneau	Normal	
	46	"	Ataxique	
BOVINS	24,2 (11,1 - 42,9)	Agneau	Ataxique	Butler Barlow 1963
	70 - 120	Adulte	Normal	Mc Pherson et all. 1964
	93	Adulte	Normal	Cunningham 1946
	53	"	Carencé	
	100	Adulte	Normal	Allcroft 1952
	30 (10 - 40)	"	Carencé	
	78 - 110	Adulte	Normal en stabul.	Spaïs 1959
	55,4 p 100 entre)	"	Bovins au pâturage	
	31 et 70)		(Nord de la Grèce)	
	20,7 p 100 > 70)			
	75 - 100	Adulte	Normal	Cunha et coll.
	132 $\pm$ 4	Adulte	Normal	Bellanger 1968

Un excès de cuivre dans la ration ne provoque pas d'augmentation rapide de la cuprémie. Le foie joue le rôle de régulateur et ce n'est que peu de temps avant la crise hémolytique que le cuivre sanguin s'élève pour atteindre des valeurs de 1000 à 1400 µg/100 ml en pleine crise (190, 191).

Dans l'ensemble la cuprémie est modérément modifiée par des changements raisonnables du cuivre alimentaire (XV), parce que le foie stocke l'excès et au contraire libère du cuivre en cas de besoin. Pour cette raison le diagnostic de carence en cuivre porté sur le sang est plus restrictif que s'il est porté sur le foie (16).

c.2.2 - Le molybdène et les sulfates

L'effet de ces éléments interférents sur le cuivre sanguin n'est pas constant et les résultats obtenus par différents chercheurs sont souvent contradictoires.

Ainsi Dick (55), Butler et Barlow (32) ont obtenu, chez la brebis, avec un régime supplémenté en molybdène et sulfates et pauvre en cuivre, une augmentation du cuivre sanguin. Huisingh et Matrone (92) confirment ces résultats sur des agneaux recevant un aliment semi-synthétique renfermant 15 mg Cu/kg MS, 40 mg Mo/kg MS et 0,28 p.100 de soufre : la cuprémie augmente rapidement et se maintient plusieurs semaines.

Par contre, sous d'autres conditions, le molybdène peut réduire le cuivre sanguin ou le maintenir à un niveau de carence (47, 60). Le molybdène seul, à des taux assez élevés (20 ppm) (92), de même que le soufre seul pour des valeurs également hautes (0,2 à 0,4 p.100) (92, 181) peuvent conduire à une hypocuprémie sur des moutons recevant une ration purifiée, que celle-ci soit carencée ou normale quant à sa teneur en cuivre. Le molybdène n'a pas d'effet aux basses concentrations (0,5 à 4,5 ppm) (181), mais les mêmes quantités additionnées de soufre (0,4 p.100) provoquent une hypocuprémie (134, 181).

L'effet du molybdène associé aux sulfates dépend donc de leurs taux respectifs, et des teneurs en cuivre de la ration et des tissus animaux. D'une façon générale, pour des valeurs

relativement basses du molybdène de la ration (2 à 5 ppm) il apparaît une diminution progressive du cuivre sanguin alors que des valeurs plus fortes (15 à 50 ppm) amènent une hypercuprémie marquée et prolongée, à condition que le soufre total de la ration soit suffisant (plus de 0,2 p. 100).

Hormis leur action globale sur la cuprémie, le molybdène et les sulfates ont un effet marqué sur la distribution du cuivre dans le sang.

Avec des rations enrichies en molybdène et sulfates il se produit une augmentation de la fraction labile du cuivre plasmatique et une diminution de la fraction céruloplasminique, ceci même si le cuivre dans le sang total ou le plasma augmente (92, 157, 172, 184). Toutefois ces modifications ne semblent avoir lieu que pour des taux assez élevés en molybdène et soufre de la ration : d'après Suttle (181, 182) le cuivre plasmatique labile n'augmente que si Mo est supérieur à 4 ppm, et la céruloplasmine commence à s'abaisser quand il dépasse 8 ppm, ceci avec des rations normales en cuivre et assez fortes en soufre (0,3 à 0,4 p. 100).

Par ailleurs, le molybdène et les sulfates, au moins pour des taux élevés en molybdène (8 à 25 ppm) (182) induiraient la formation d'une fraction cuprique plasmatique nouvelle (différente des fractions céruloplasminique et albuminique) n'existant pas sur des animaux recevant une ration normale (184).

Ainsi, si la céruloplasmine et la fraction labile représentent 98 p. 100 du cuivre plasmatique total sur des moutons correctement alimentés, elles ne représentent plus que 58 p. 100 sur des animaux ingérant un régime supplémen-té en Mo et sulfates (157).

Cette fraction protéique résiduelle contient à la fois du cuivre et du molybdène dans une solide apposition (Smith and Wright non publié) et rendrait le cuivre non disponible pour le métabolisme (182). Un tel effet "systémique" du molybdène et du soufre pourrait expliquer la baisse relative du taux de céruloplasmine alors que le cuivre plasmatique augmente avec des régimes enrichis en molybdène.

c.2.3 - Le zinc, le cadmium et le plomb

Le zinc en excès dans la ration provoque une diminution rapide de la céruloplasmine dans le sang (155).

Le cadmium et le plomb inhibent la synthèse de céruloplasmine lorsqu'ils sont administrés à des doses toxiques.

Le plomb, par ailleurs provoque une élévation du cuivre des hématies sur des patients souffrant d'un empoisonnement (155).

c.3 - Influence de la gestation

Là encore les résultats sont contradictoires d'un chercheur à l'autre :

- chez les brebis gestantes Underwood pense qu'il ne se produit aucun changement caractéristique de la cuprémie. Ryley et coll. (166) confirment ces données.

Par contre Butler et Barlow (31) notent une diminution du cuivre total, du cuivre plasmatique et de la céruloplasmine, rejoignant en ce sens les conclusions d'Allcroft et Uvarov (2).

- chez les bovins Bingley et Dufty (24) notent une influence positive de la gestation sur la cuprémie : entre le troisième et cinquième mois il se produit une augmentation faible mais significative du cuivre plasmatique, avec un maximum aux troisième et quatrième mois. Le cuivre des globules rouges s'abaisse durant les quatrième et cinquième mois et augmente au neuvième mois.

Les ruminants et les ovins en particulier, se distinguent donc nettement des espèces monogastriques chez lesquelles le cuivre sanguin augmente à la fin de la gestation. Notons aussi que l'administration d'oestrogènes si elle a une action positive sur la cuprémie chez le rat et l'homme, n'a aucun effet sur les ovins (XV).

- Après la parturition la cuprémie et la céruloplasmine augmentent sur les brebis pour atteindre un maximum en une semaine et chuter ensuite (128). Sur les agneaux la cuprémie faible à la naissance atteint les valeurs de l'adulte en quelques jours (XV).

c.4 - Influence de la pathologie

Certaines maladies provoquent des variations du cuivre dans le sang. Une infection aiguë peut faire doubler la cuprémie sur des moutons malgré une teneur normale en cuivre de la ration ; par contre certaines infestations parasitaires (haemonchoses) peuvent provoquer une hypocuprémie (125). Sur des veaux les mêmes observations ont été faites avec *Bunostomum Phlebotomum* (XV).

c.5 - Influence de la saison

D'après les résultats de Bellanger (16) la teneur en cuivre du plasma des bovins est maximale en automne, elle s'abaisse en hiver pour atteindre une valeur minimum au printemps.

Sur des brebis Butler et Barlow (31) relèvent un minimum en février et un retour à la normale dès le mois de mai.

En fait ces variations saisonnières ne sont que le reflet des niveaux du cuivre alimentaire, les animaux recevant du foin plus pauvre en cuivre en hiver et des fourrages frais à partir du printemps.

d - Teneurs en cuivre du poil

d.1 - Valeurs moyennes

Plusieurs auteurs se sont intéressés à la teneur en cuivre des poils. Le poil, moins sensible aux fluctuations de brève durée, donnerait une idée plus fidèle du bilan cuprique de l'animal.

Les teneurs en cuivre sont faibles : de 3 à 15 ppm.

Cunningham et Hogan (50) notent une valeur moyenne de 9,1 µg/g et Bellanger (16) $9,5 \pm 0,3$ µg/g.

d.2 - Facteurs de variation

En dehors des contaminations fréquentes par les excréments ou du lessivage par la pluie certains facteurs modifient la teneur en cuivre du poil.

d.2.1 - Lieu de prélèvement des poils

D'après Anke (8) les poils du chignon sont légèrement plus riches en cuivre que ceux du corps. Cette constatation est probablement à mettre sur le compte des mues et de l'âge du poil ; en effet les poils de la tête ne muent qu'une fois par an et leur âge est ainsi moins bien connu (29).

d.2.2 - La gestation peut induire une légère baisse au moment de la mise bas (8).

d.2.3 - L'alimentation ne provoque des variations du cuivre pilaire que pour des écarts importants du cuivre de la ration (16).

Cependant en cas de carence grave, le taux de cuivre dans les poils s'abaisse en dessous de 7 - 8 $\mu\text{g/g}$ (9, 16). De même le molybdène et les ions sulfates en excès dans la ration provoquent une diminution du cuivre des poils (50).

d.2.4 - La couleur des poils, si elle influe beaucoup sur les minéraux fixés par la mélanine (Mn - Se - Co - P - K - Ca) n'agit que peu ou pas sur le cuivre (XV, 29, 50).

d.2.5 - L'âge des poils et leur vitesse de renouvellement est très variable d'un animal à l'autre, et même d'une partie du corps à l'autre sur un même animal. Leur influence est marquée au niveau du poil pour certains minéraux (Ca - Mg - P - K - Na) ; elle semble beaucoup plus discrète pour le cuivre (29), mais explique certaines différences saisonnières (XV).

e - Teneurs en cuivre du lait

La concentration moyenne en cuivre dans le lait, identique pour les ovins et les bovins est comprise entre 100 et 200 $\mu\text{g/litre}$ (77).

TABLEAU XLIX : Teneur en Cuivre de différents organes

Organe	BOVINS					OVINS				
	Adulte	Adulte ♀	Nouveau Né	Nouveau Né	Fœtus	Fœtus	Adulte	Agneau normal	Agneau Ataxique	Fœtus
Surrenales		8,9								
Os (patte)		0,49								1,0
Os (côte)		0,15								
Moelle os		0,31								
Cerveau		11,4								9,0
Oeil (H.Vitrée)		4,3						24,2	5,3	
Oeil (Sclérotique)		2,2						18,4	31,9	
Coeur	15,6	16,4					17,9			15,7
Rein	19,7	16,6		14,8	10,4	12,7	17,8	27,2	9,9	15,8
Poumons	5,3	5,4		15,7	8,5	10,8	9,6		22,0	7,9
Muscle		1,3		4,9	3,6	5,9		17,5	11,3	5,0
Gonade		5,3					7,7			3,3
Pancréas	3,8	2,9		8,5		2,8				5,7
Peau		0,88				7,6				2,9
Rate	2,9	3,9		4,8	5,4	10,7	5,0	21,0	14,9	
Thymus		1,6								
Tyroïde		3,1								
Langue		4,8				6,6		48,0	92,6	8,2
Nerf										
								22,8	31,7	
Références	Cunning- gham* 1931	Bingley Dufty 1972	Cunning- gham* 1931	Bingley Dufty 1972	Cunning- gham* 1931	Pryor 1964	Cunning- gham* 1931	Korcher 1962		Pryor 1964

* Cunningham 1931 cité par Underwood 1971

Le colostrum est plus riche en cuivre et progressivement la teneur décline (XV).

En cas d'apport insuffisant dans l'alimentation le cuivre du lait peut tomber à des valeurs aussi basses que 10 - 20 $\mu\text{g/litre}$ chez des brebis et des vaches (XV). L'excès de cuivre dans la ration ne provoque pas de grandes variations dans le lait des vaches, des brebis et des chèvres. Par contre les injections sous-cutanées de 300 mg de cuivre sous forme de glycinate conduisent à une augmentation sensible du cuivre dans le lait (XV).

f - Teneur en cuivre de différents organes

Les valeurs relevées par différents auteurs sont consignées dans le Tableau XLIX. Certains tissus sont sensibles aux taux de cuivre alimentaire. Ce sont le cerveau, les reins et la rate qui sont le plus touchés par la carence. En cas d'excès les reins, la rate et les poumons accumulent plus de cuivre. Les glandes endocrines, les muscles, le coeur et la peau sont peu sensibles aux variations d'apport en cuivre (XV).

Dans les parties pigmentées de l'oeil des concentrations très élevées en cuivre sont signalées : 105 ppm dans l'iris du mouton et 88 ppm dans la choroïde. La cornée, la sclérotique et le cristallin ont au contraire des taux très faibles (XV).

3 - Biochimie du cuivre

a - Forme du cuivre dans les tissus

Le cuivre, de par ses propriétés physicochimiques (causticité surtout) n'existe pas à l'état ionisé, libre dans les tissus. S'il peut exister à l'état d'ion dans le tractus digestif il est protéolié dans les organes.

Il existe trois grand types de protéines contenant du cuivre :

- la céruloplasmine,
- les cupro-protéines tissulaires,
- les cupro-enzymes.

a.1 - La céruloplasmine

Ce pigment bleu plasmatique est une glycométalloprotéine du groupe des α -2 globulines. Elle renferme des hexoses, de l'acide sialique et un acide aminé terminal. Son poids moléculaire est de 132 000 et elle contient 6 atomes de cuivre intrinsèques et un septième labile. Son point isoélectrique est à $pHi = 4,4$ et sa constante de sédimentation est de 7,1 (74, 168).

Sa structure est discutée : il semble que la céruloplasmine ait une configuration tétramérique du type L₂H₂ avec deux chaînes lourdes (H) et deux chaînes légères (L) (74).

a.2 - Les cuproprotéines tissulaires

Toutes ces protéines représentent la majeure partie du cuivre des tissus.

a.2.1 - Chez les adultes les diverses cytocupréines isolées ont été pendant très longtemps considérées uniquement comme des formes de stockage du cuivre. On en distingue plusieurs variétés très proches l'une de l'autre : l'hépatocupréine issue du foie, l'hémocupréine des globules rouges (semblable à l'érythrocupréine de l'homme) et la cérébrocupréine du tissu nerveux (160, 161, XV).

Toutes ces protéines sont solubles. Leur poids moléculaire se situe entre 30 et 35000, et elles contiennent deux atomes de cuivre (soit 0,3 à 0,4 p.100 Cu) (XV, 76). Le cuivre de la molécule n'est pas dialysable (160). Leur spectre d'absorption est variable : la cérébrocupréine est un pigment vert (160) tandis que l'hémocupréine est bleue (XV). Mais depuis 1971, toutes ces protéines ont révélé une activité enzymatique unique et ont été rattaché aux super-oxydes dismu-

tases (S.O.D.) (71). Seule la cupro-zinc S.O.D. nous intéresse. Cette enzyme est composée de deux sous-unités identiques chez les bovins ; chaque sous-unité contient un ion Cu^{++} , un ion Zn^{++} , un groupement SH et un pont disulfure. Le cuivre est le support de l'activité catalytique tandis que le zinc sert à maintenir la stabilité de l'enzyme (76). Ainsi au rôle de stockage vient s'ajouter un rôle enzymatique particulier.

a.2.2 - Une autre cuproprotéine, la chélatine, a été isolée du foie en réponse à des injections de cuivre. Cette molécule est proche de la métallothionéine (protéine de stockage du zinc dans le foie) par sa taille (8000 pm) et par sa haute teneur en cystéine, mais possède des propriétés chromatographiques et électrophorétiques différentes (72).

a.2.3 - Chez le nouveau né il existe une cuproprotéine particulière extraite des mitochondries hépatiques (lysosomes lourds) : la mitochondrocupréine. Cette protéine insoluble contient plus de 4 p.100 de cuivre, non dialysable et plus de 25 p.100 de cystine (161). Cette molécule spécifique de la période néonatale aurait un rôle de stockage du cuivre et servirait de réservoir pour la formation de cytochrome oxydase.

En dépit de cette diversité des cuproprotéines, les formes de stockage physiologique du cuivre sont mal connues.

a.3 - Les cupro-enzymes

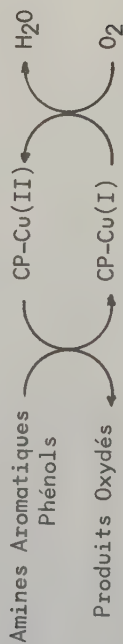
En dehors des formes majeures que nous venons de voir, une faible quantité de cuivre existe sous la forme de protéines enzymatiques.

Actuellement, une douzaine d'enzymes sont connues pour avoir une liaison exclusive avec le cuivre ; les principales sont la cytochrome c oxydase, la polyphénol oxydase ou tyrosinase, les amines oxydases, la céramide galactosyl transférase, la lysine oxydase, la galactose oxydase, la dopamine β hydroxylase, l'uricase hépatique et bien entendu la céruloplasmine.

GROUPE I



GROUPE II



GROUPE III

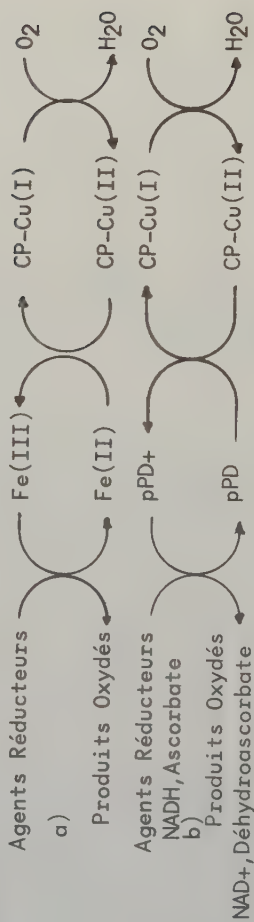


Figure 9 : Activité Oxydase de la Céruloplasmine.

D'autres métalloenzymes ont des liaisons avec plusieurs métaux : la S.O.D. (Cu et Zn), la xanthine oxydase (Mo ou cuivre), les déshydrogénases (Fe ou Cu).

Dans ces systèmes enzymatiques le cuivre, bien que généralement présent en faible quantité, joue un rôle biochimique capital.

b - Rôle biochimique du cuivre

b.1 - Rôle de la céruloplasmine (E.C. 1 - 12 - 3 - 1)

Nous savons que la céruloplasmine constitue la forme essentielle de transport du cuivre. Mais elle possède une activité oxydasique propre, et intervient dans le métabolisme du fer.

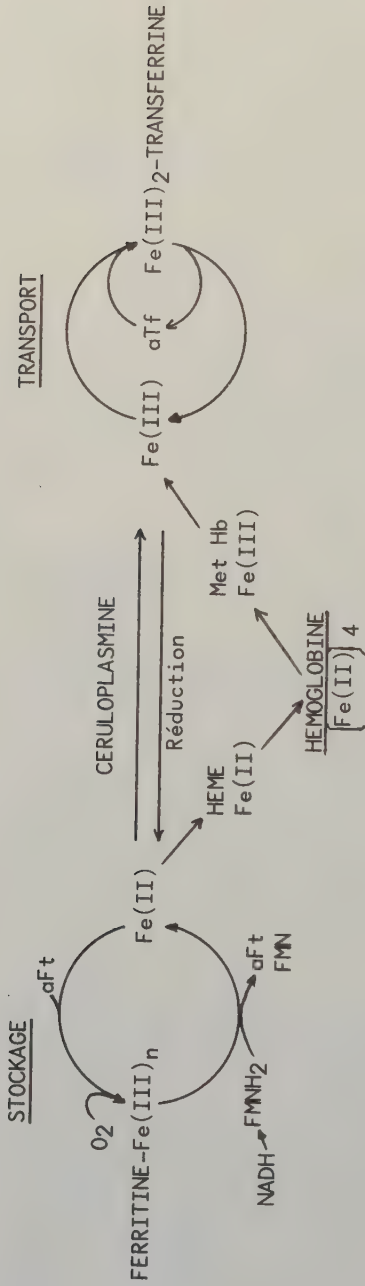
b.1.1 - Activité oxydasique : trois principaux groupes de substrats constituent le support de cette activité (74, Figure 9).

- Le fer : la céruloplasmine est capable d'oxyder le fer (II) en fer (III), parallèlement le cuivre de la molécule passe du stade II au stade I.

- Les amines aromatique et les phénols : ce groupe contient des substrats très importants tels ceux de la série des amines biogènes (adrénaline, noradrénaline ...), de la série des 5-hydroxyindoles (hydroxytryptamine, hydroxytryptophane ...) et de la série des phénothiazines (prométhazine, chlorpromazine ...).

Cette activité oxydasique sur les catécholamines et la série des hydroxyindoles laisse entrevoir un rôle possible de la céruloplasmine dans la régulation des amines biogènes (74).

- Le troisième groupe renferme des pseudosubstrats variés et intermédiaires du métabolisme du fer (agent réducteurs) et des diamines aromatiques (substitués de la p. phénylène diamine p.P.D.) (74,122).



* aFt=apoferritine. aTf=apotransferrine

Figure 10 : Rôle de la Céruloplasmine dans le métabolisme du Fer.

b.1.2 - Intervention dans le métabolisme du fer

L'activité ferroxidase de la céruloplasmine confère à cette cuproprotéine un rôle particulier dans le métabolisme du fer : elle constitue le lien moléculaire entre le métabolisme du cuivre et du fer (74, 165 - Figure 10).

Le fer est stocké dans les cellules hépatiques sous forme de Fe (III)-ferritine. Il est libéré de cette protéine par une enzyme spécifique, la ferritine réductase (avec FMNH₂). La céruloplasmine contrôle la quantité de Fe (II) convertie en Fe (III) et ensuite en Fe (III)₂-transferrine dans le plasma. Le fer est enfin distribué aux réticulocytes pour entrer dans la composition d'hémoglobine (72, 73).

Par conséquent la céruloplasmine joue un rôle essentiel dans la mobilisation des réserves ferriques et leur distribution aux cellules responsables de la synthèse d'hémoglobine, et de myoglobine.

b.2 - La cytochrome oxydase (1 - 9 - 3 - 1)

Cette enzyme est la plus importante de toutes celles contenant du cuivre.

Elle est constituée par la juxtaposition du cytochrome a et du cytochrome a₃, et fait partie de la chaîne respiratoire dont elle représente le dernier maillon, transportant les électrons sur l'oxygène (199). Cette cuproenzyme, formée de deux hèmes et de deux protéines, catalyse l'oxydation du cytochrome c réduit et transmet les électrons à l'oxygène seul accepteur pour ce système. Le poids moléculaire est de 75 000 par molécule d'hème. (15, 199). Chacun des cytochromes a et a₃ est associé à un atome de cuivre (15).

Le système cytochrome oxydase intervient dans les processus de respiration cellulaire au niveau des mitochondries ; il oxyde les substrats du cycle de Krebs. Son action est très large et il intervient dans le métabolisme musculaire, dans le métabolisme cardiaque, la respiration pulmonaire... .

b.3 - La polyphénol oxydase ou tyrosinase

La tyrosinase est une cuproenzyme localisée dans le cytoplasme des mélanocytes. Deux types de valences existent pour les atomes de cuivre de la molécule mais seul le cuivre cuivreux est enzymatiquement actif (30).

Elle catalyse la synthèse de mélanine, pigment colorant les phanères à partir de la tyrosine, et utilise 5 atomes d'oxygène pour réaliser cette oxydation.

b.4 - Les amines oxydases

Le groupe des amines oxydases est composé de nombreuses variétés d'enzymes largement répandues dans les tissus. Le classement s'effectue en fonction des substrats : monoamine, diamine, benzyl amine oxydase Beaucoup de ces protéines contiennent du phosphate de pyridoxal et du cuivre (33).

L'amine oxydase au sens strict est une flavoenzyme cupro dépendante. Elle comprend des groupements sulfhydriles indispensables et du cuivre sous forme cuivrique (19). On la trouve essentiellement dans le plasma et les mitochondries de nombreux tissus (foie, rein, coeur, muscle, cartilage, tendon, peau, cerveau, aorte) (33). Son rôle est la destruction d'amines à haute activité biologique ; parmi les substrats les plus importants il faut rappeler la tryptamine et ses dérivés, les catécholamines et l'histamine.

Une autre amine oxydase cuprodépendante intervient dans le métabolisme du tissu conjonctif : la lysine oxydase (33, 71). Cette enzyme réalise l'oxydation des amines de la lysine au niveau du carbone ϵ , faisant apparaître des fonctions aldéhydes. Celles-ci sont engagées dans des liaisons responsables de la cohésion et de l'insolubilité des protéines du tissu conjonctif : l'élastine et le collagène (33, 36, 71). Son rôle est donc fondamental dans la formation du collagène et de la matrice protéique de l'os ainsi que dans l'élaboration de la paroi des grosses artères (aorte notamment) (33, 79).

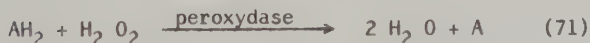
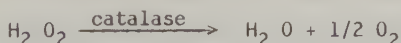
b.5 - Les superoxydes dismutases

Ces enzymes particulières, découvertes récemment, sont de trois types : l'une est une cupro-zinc protéine isolée du cytoplasme de nombreuses cellules, l'autre une mangano-protéine découverte dans la matrice des mitochondries et enfin le dernier type est une ferri-enzyme présente dans certaines bactéries et algues bleues (76).

La cupro-zinc superoxyde dismutase (autrefois nommée cytocupréine), tout comme les autres S.O.D., est une enzyme caractéristique de l'adaptation au milieu aérobie. En effet le métabolisme des cellules en présence d'oxygène conduit inévitablement à la formation de composés toxiques, les superoxydes et les peroxydes. Ces toxiques intermédiaires sont atténués par un ensemble de métalloenzymes : les S.O.D. et les hème-enzymes (peroxydase et catalase) (72). La Cu - Zn S.O.D. intervient sur O_2^- par une réduction et une réoxydation successives du Cu^{++} (76). La réaction de dismutation est la suivante :



Ce système est soutenu par des hème-enzymes (avec du fer) qui décomposent les peroxydes :



Le cuivre, par les S.O.D., et le fer, par les peroxydase et catalase, sont donc indispensables à la survie des cellules en présence d'oxygène.

b.6 - Céramide galactosyl transférase

Cette enzyme cuprodépendante intervient dans l'anabolisme des phospholipides, constituants majeurs du tissu nerveux. Elle catalyse la condensation des glycérophosphates sur l'acyl-coenzyme A, permettant ainsi une synthèse normale de la myéline et de la cérébroside (112).

b.7 - Galactose oxydase

Cette métalloenzyme d'un poids moléculaire de 42000 possède un atome de cuivre sous forme cuivrique par molécule ainsi que du pyridoxal. Elle catalyse la réaction du galactose avec l'oxygène et intervient dans le métabolisme des glucides (37, 71).

b.8 - Dopamine β hydroxylase

Le cuivre intervient directement dans le fonctionnement de cette enzyme. Elle est responsable de l'hydroxylation de la dopamine dans la synthèse des catécholamines (noradrénaline et adrénaline) (71).

b.9 - Uricase

L'uricase est une cuproenzyme à localisation hépatique. Elle achève le métabolisme des bases puriques. Celles-ci sont dégradées en acide urique et, chez les ruminants, une partie de cet acide urique est dégradé à son tour en allantoiné avec intervention de l'uricase.

b. 10 - Oxydation des groupement sulfhydriles

Le cuivre, sous une forme cuivrique, catalyse, par un mécanisme encore inconnu, l'oxydation des groupements sulfhydriles de la prékératine pour la formation des ponts disulfures de la kératine (IV).

En cas de carence en cuivre cette oxydation est insuffisante ce qui provoque des anomalies dans la kératinisation des poils et de la laine.

Le rôle biochimique du cuivre repose essentiellement sur une activité oxydasique. Cet oligoélément intervient dans divers systèmes enzymatiques soit directement, soit comme co-enzyme, soit en figurant dans une enzyme à côté d'un autre constituant qui joue le rôle principal.

4 - Interrelations entre oligoéléments

Maintenant que nous connaissons mieux les étapes du métabolisme du cuivre nous pouvons envisager les relations existant entre certains éléments et le cuivre, le niveau et si possible le mécanisme de ces interactions. En dehors du calcium, déjà étudié, certains éléments agissent comme antagonistes du cuivre et peuvent être à l'origine de carences secondaires ou induites. D'autres au contraire ont une action synergique ou complémentaire.

a - Relations cuivre - fer

Le fer et le cuivre sont tous deux nécessaires à l'hématopoïèse. Le fer intervient dans la synthèse à la fois de l'hème et de la globine pour l'hémoglobine alors que le cuivre n'intervient pas dans ces réactions (XV).

Le fer ne modifie pas l'absorption du cuivre et inversement, sauf en cas de carence grave en cuivre où l'absorption du fer est diminuée (170, 195) ; ces deux oligoéléments bénéficieraient d'un système de transfert différent au niveau intestinal (170).

Nous savons que le lien entre le cuivre et le fer est réalisé par la céruloplasmine ; elle permet la libération et la mobilisation du fer des protéines de stockage et par suite sa distribution aux cellules pour la synthèse d'hémoglobine. Accessoirement le cuivre favorise le développement des réticulocytes (XV). Ceci explique que certaines anémies rebelles au traitement par le fer soient traitées avec succès par des injections de cuivre.

b - Relations cuivre - cobalt

Nous avons vu que le cobalt est bénéfique dans le stockage hépatique du cuivre.

Selon Becker et all. (14) le cobalt intervient dans le métabolisme du cuivre en augmentant sa digestibilité à partir des fourrages. Mais le mécanisme d'action n'est pas élucidé ;

peut être est-ce une conséquence de l'augmentation de digestibilité de la cellulose, le cobalt permettant une activité optimum de la flore ruminale ?

c - Relations cuivre-zinc, cuivre-cadmium, cuivre-plomb

Ces trois éléments agissent comme antagonistes du cuivre et tout particulièrement lorsque les apports en cuivre sont faibles (155, 195). En cas d'apport excessif dans la ration ils peuvent provoquer des symptômes analogues à ceux de la carence en cuivre.

Pour le zinc Van Campen (194) a montré que l'antagonisme avec le cuivre se situait essentiellement au niveau de l'absorption intestinale. Ces deux oligoéléments se concurrenceraient pour un même site d'absorption et même pour un "transporteur" commun qui pourrait être la métallothionéine (63, 64, 177, 182). Une fois la barrière intestinale franchie, le cuivre et le zinc entreraient en compétition au niveau des albumines pour le transport dans le sang (62).

Le cadmium présente des similitudes chimiques avec le zinc. D'après Evans et all. (64) l'antagonisme du cadmium avec le cuivre s'exerce de la même façon que celui du zinc ; le cadmium venant concurrencer le cuivre au niveau de sa protéine de transfert et prenant sa place (177). L'antagonisme Cd - Cu est d'ailleurs beaucoup plus fort que l'antagonisme Zn - Cu (182).

Cependant, tant que les mécanismes intimes de l'absorption du cuivre ne sont pas élucidés, de telles hypothèses demeurent spéculatives.

Le plomb, en cas de pollution industrielle, peut atteindre des taux élevés dans les pâturages. Ce métal toxique conditionne certaines carences secondaires en cuivre, mais son mode d'action n'est pas connu : il semble agir en limitant l'absorption intestinale du cuivre et en bloquant certains systèmes enzymatiques. Réciproquement le cuivre en diminuant l'absorption du plomb, agit favorablement sur la toxicité de ce métal lourd (155).

d - Relations cuivre - molybdène - soufre

Le molybdène, nous le savons, agit comme un antagoniste important du cuivre : des rations trop riches conduisent à des carences cupriques induites au niveau de l'animal (XV, 193).

Mais cet effet toxique du molybdène est étroitement dépendant du taux de sulfates des aliments : seul, cet oligo-élément ne modifie pas la rétention du cuivre alimentaire (56, 57, 136). En réalité le molybdène interfère aussi bien avec le soufre minéral qu'avec le soufre organique (méthionine, cystine) (181) : le troisième composant de l'interaction Cu - Mo est donc le soufre total de la ration.

Chez les ruminants, les composés soufrés alimentaires ont généralement tendance à accentuer la toxicité du molybdène (157) ; mais dans certains cas, ils peuvent atténuer l'antagonisme Mo - Cu (XV, 92, 193).

Sur le plan métabolique, le molybdène associé au soufre, provoque une diminution de l'utilisation du cuivre alimentaire ; il apparaît une baisse de la digestibilité et de la rétention du cuivre : l'excrétion fécale, l'excrétion urinaire et les pertes dans le lait sont augmentées (132, 133, 157, 172). Cette interaction est si marquée que des variations, même faibles, des éléments interférents dans la ration ont un effet significatif sur le bilan cuprique des animaux : une augmentation du molybdène de 0,5 à 4,5 mg/kg MS, ou du soufre de 2 à 3 g/kg MS abaisse la digestibilité du cuivre de 50 p.100 (181, 182).

Les sulfates modifient également la rétention du molybdène à la fois en réduisant l'absorption intestinale et en augmentant l'excrétion urinaire (54, 55, 157).

Les multiples facettes des interrelations Cuivre-molybdène et soufre ne peuvent être expliquées par un mécanisme unique, et mettent en jeu des sites divers :

d.1 - Dans le tube digestif

D'après Suttle (181, 182), l'interaction Cu - Mo - S prend place essentiellement dans le tractus digestif : elle comporte une baisse de l'absorption à la fois du cuivre et du molybdène probablement par formation dans le rumen de complexes insolubles très peu métabolisés.

d.1.1 - Précipitation de sulfure de cuivre

Les ruminants ont la particularité de pouvoir dégrader les composés soufrés alimentaires (minéraux ou organiques) en sulfures ; ceux-ci sont normalement absorbés et détoxifiés dans le foie ou bien utilisés dans la synthèse des acides aminés.

Mais quand ils sont en excès dans le rumen ils peuvent conduire à la formation de sulfure de cuivre (Cu S) éliminé en grande partie par les fécès (81, 176).

Ce mécanisme semble prédominant et la digestibilité du cuivre est alors étroitement dépendante du "pool" de sulfures dans le rumen.

Le rôle du molybdène est encore mal cerné :

- il favoriserait la réduction des composés soufrés en sulfures (81, 193) ; l'inhibition de ce mécanisme n'apparaissant que pour des taux de Mo supérieurs à 8 ppm (Suttle non publié).

- Huisingh et Matrone (92) pensent que la nature du soufre alimentaire détermine le sens de la relation molybdène-sulfures : si la ration contient du sulfate comme source majeure de soufre le molybdène inhibe la réduction des sulfates en sulfures et diminue leur concentration ; dans ce cas le molybdène atténue les symptômes de carence en cuivre ; mais si la source majeure est constituée d'acides aminés soufrés (régimes protéiques) le molybdène augmente la formation et la concentration des sulfures ; dans ce cas le molybdène accentue la carence en cuivre.

d.1.2 - Formation d'un complexe molybdate-cuprique

Le cuivre et le molybdène formeraient dans le rumen, un complexe voisin d'un minéral naturel, la lindgrenite ($(\text{Cu Mo O}_4)_2$, Cu (OH)_2). Ce complexe, serait absorbé mais rendrait le cuivre inutilisable pour le métabolisme (en particulier la synthèse de céruloplasmine) (134).

Des études récentes (92) montrent en fait qu'un tel complexe, s'il peut éventuellement exister dans le rumen, n'existe pas en tant que tel dans le plasma.

d.1.3 - Formation d'un complexe ternaire

Au niveau du rumen (pH faiblement basique) les sulfures réagissent avec le molybdène pour produire un complexe binaire le thiomolybdate ($\text{Mo O}_x \text{S}_4 - x^{2-}$) (59). Dans un deuxième temps il apparaît un complexe ternaire "thiomolybdate cuprique" ($\text{Cu}^{++} \text{Mo O}_x \text{S}_4 - x^{=}$) insoluble responsable de la mauvaise absorption et de la faible digestibilité du cuivre (59, 136, 182).

Un tel complexe thiomolybdate n'a pu encore être mis en évidence "in vivo". Cependant une telle hypothèse peut expliquer la baisse d'absorption simultanée du cuivre et du molybdène dans le tractus digestif et est en accord avec l'effet synergique des sulfates sur la toxicité du molybdène (136).

d.2 - Dans les tissus

Si les interactions au niveau digestif sont, dans leurs grandes lignes, discernables, nos connaissances au niveau tissulaire (sang et foie surtout) sont encore très limitées.

Il semble, d'ailleurs, que ces interférences deviennent de plus en plus importantes au fur et à mesure que le molybdène ou le soufre de la ration sont augmentés.

Depuis les travaux de Marcilese et coll. (132) il est clair que des interactions métaboliques cuivre/Mo + S existent au niveau hépatique.

Mais pour l'instant les mécanismes sont inconnus, et seules des hypothèses sont avancées : le Mo et le soufre, ensemble, gênent les entrées et les sorties du cuivre au niveau du foie, ce qui perturbe son utilisation pour la synthèse de céruloplasmine et des complexes de stockage (92).

Plus récemment le complexe thiomolybdate a été mis en cause (136). Ce complexe provoque la formation dans le sang de protéines cupriques (p.m. = 60 à 80 000) analogues à celles découvertes par Suttle et Field (184) et limite l'incorporation du cuivre dans ses sites fonctionnels : le cuivre peut s'accumuler dans les tissus mais sous une forme biologiquement inutilisable.

Les thiomolybdates ont donc une double action ; la prédominance de l'un ou de l'autre des mécanismes étant déterminée par la quantité relative de cuivre et de thiomolybdates (ou précurseurs) (136) :

- pour des taux de Mo et S faibles dans la ration, le site d'interaction serait le tractus digestif.

- mais pour des régimes plus riches en Mo l'interaction systémique (changement dans la distribution du cuivre) s'intensifie. Ces conclusions sont en accord avec les hypothèses de Suttle (182).

d.3 - Au niveau enzymatique

En conditions normales les sulfures du rumen passent dans le foie où ils sont détoxyfiés en sulfates. Cette réaction est sous la dépendance d'une enzyme la "sulfure oxydase". Le molybdène inhibe cette enzyme, ce qui conduit à l'accumulation de sulfure. La formation ultérieure de sulfure de cuivre insoluble dans les tissus, peut constituer un mécanisme supplémentaire d'interactions Cu/Mo S (182, 193)

La Xanthine oxydase montre des changements dans sa composition en oligoéléments, plusieurs isoenzymes contenant Cu et Mo existent et leur proportion varie en fonction du rapport Cu/Mo dans la ration (182).

De telles interactions au niveau enzymatique représentent encore un vaste champ d'exploration, très mal connu.

Malgré de nombreuses recherches, les relations Cu/MoS sont encore peu expliquées, et d'autant plus que d'autres facteurs de la ration mal contrôlés (protéines, complexes divers, Mn, P ...) viennent compliquer le problème lors d'une alimentation plus naturelle que les rations de laboratoire.

5 - Les besoins en cuivre - La toxicité

a - Les besoins

L'estimation des besoins en cuivre pose toujours beaucoup de difficultés : les quantités nécessaires sont faibles et les différentes méthodes d'évaluation utilisées (calcul des bilans, teneurs des herbages ou des rations responsables de l'apparition ou de la correction des signes de carence, étude des relations entre la concentration de la ration et la réponse physiologique ...) ne constituent qu'une approche imparfaite ; les variations liées à la race et à l'individu compliquent le problème ; enfin certains facteurs de la ration sont susceptibles de modifier l'utilisation du cuivre par l'animal (molybdène et sulfates par exemple).

Dans ces conditions les besoins comportent une certaine imprécision et il n'est pas possible de définir nommément des besoins de croissance, d'entretien ou de production ; les valeurs retenues par les chercheurs n'expriment qu'une valeur globale de ces besoins.

Dans la pratique les apports recommandés sont issus du seuil de carence, c'est-à-dire de la valeur limite au-dessus de laquelle la fréquence et la gravité des accidents tendent vers zéro. A cette teneur minimum il est ajouté une certaine marge de sécurité, convenable pour une ration de qualité normale et ne contenant pas de constituants interférents classiques avec le métabolisme du cuivre (111, 114, Tableau L).

TABLEAU L : Seuils de carence et de toxicité comparés pour la plante et le ruminant
(en ppm/MS)

Elément	Fourrages		Ruminants			
	Seuil de carence	Seuil de toxicité	Teneurs normales	Seuil de carence	Besoins Ration classique Ensilage maïs + soufre	Seuil de toxicité
Cuivre	2 - 4	20	4 - 15 (jusqu'à 25 en zo- ne industrielle)	Bovins adultes 7 Jeunes bovins 5 - 7 Ovin rustique 4 - 5 Mérinos 6	10 5 - 10 10 - 14	Bovins adultes : 100 - 200 Jeunes bovins : 40 - 100 Ovins 15 - 30
Molybdène	0,1	aucun	0,1 - 20 except. 300	Ovins : < 0,1 ; 0,03 0,1 ⇒ tox. Cu Bovins : 0,1	0,1 0,1	3 Variable sui- vant taux Cu. Bovins plus sensibles

Les besoins étant exprimés en concentration dans la matière sèche ingérée, il importe que la ration soit adéquate quant à ses constituants de façon à ne pas perturber l'appétit de l'animal.

a.1 - Le seuil de carence en cuivre

Chez les bovins il varie avec les auteurs. Ainsi Cunningham (48) et Becker et coll (14) retiennent 5 mg Cu/kg MS ; Underwood (XV) donne une gamme de 4 à 10 ppm/MS suivant les taux de molybdène chez les adultes et 5 à 7 ppm chez les jeunes. Kirchgessner et Grassman (102) proposent 7 à 8 mg Cu/kg ce qui rejoint les normes françaises (20).

Lorsque les conditions d'alimentation sont adéquates on peut retenir le taux de 7 ppm comme limite de carence sur les bovins (114).

Chez les ovins Underwood (XV) distingue les races anglaises et les croisements, et la race Mérinos : pour les ovins rustiques le seuil est à 4 ppm alors qu'il atteint 6 ppm pour le Mérinos.

La toxicité du molybdène peut augmenter ces seuils de carence en cuivre : à partir de 3 mg/kg MS cet élément interfère avec le cuivre de la ration, surtout si celui-ci est inférieur à 5 ppm (I, XV). Puis au fur et à mesure que la teneur en cuivre s'élève la toxicité du molybdène apparaît pour des valeurs plus élevées : à 10 ppm de cuivre dans la ration le molybdène devient toxique vers 10 - 15 mg/kg MS (111, 189). Par ailleurs les sulfates potentialisent cet effet toxique du molybdène (57), d'autant plus qu'ils sont présents en quantité élevée (193).

a.2 - Les normes alimentaires adoptées actuellement

sont de 10 ppm chez les bovins (I, 108).

Pour les ovins, elles se situent entre 5 et 10 ppm Cu maximum (I, XV) en raison de la sensibilité extrême de ces animaux à l'intoxication cuivrique.

TABLEAU LI : Influence du soufre sur la digestibilité et la rétention du
Cuivre
Lamand 1974

Régime	S ajouté : g/kg MS	Teneur Cu : mg/kg MS	Digestib. : %	Rétention : mg/100 kg PV
Urée + caseïne + S	0,6	5,5	22,3	3 *
Urée + caseïne	0	5,7	27,1	4,2
Urée + caseïne + S	2,9	4,7	12,9	1,6
Urée + caseïne	0	4,6	12,8	1,4
Urée + caseïne + S	2,9	8,4	24,4	5,7
Urée + cas. + S + maïs grain	2,9	6,8	25,3	6

Ces normes ne constituent que des recommandations proposées pour une ration équilibrée en ses autres constituants, et ne comportant aucune des interférences majeures que nous avons décrites. Elles comportent une marge de sécurité suffisante pour convenir à la plupart des régimes couramment utilisés en France, et représentent un équilibre important à respecter.

Cependant, si elles conviennent parfaitement pour des rations classiques, c'est-à-dire à base de foin ou autre aliment grossier supplémené avec des grains et des tourteaux (ou toute autre source d'azote majeur) il convient de les modifier dans le cas des ensilages de maïs enrichis en soufre.

a.3 - Cas des ensilages de maïs enrichis en soufre et en urée

L'ensilage de maïs a une valeur protéique insuffisante et il renferme de 0,9 à 1,5 g soufre/kg MS. L'addition d'urée permet aux ruminants la synthèse d'acides aminés dans le rumen ; pour une bonne valorisation de cette source d'azote non protéique le soufre est nécessaire à la synthèse des acides aminés soufrés, à condition que le niveau énergétique de la ration soit suffisant.

La teneur optimum en soufre est estimée à 1,5 à 2 g S/kg MS chez le mouton et entre 1,6 à 2,4 S/kg MS chez les bovins. Le chiffre moyen de 2 g S/kg MS peut être retenu pour les deux espèces (106).

Une série d'expérimentations réalisées sur des agneaux en croissance (106) a montré que l'addition normale de soufre interférait avec la rétention du cuivre, et ceci d'autant plus que la valeur énergétique de l'ensilage est faible (Tableau LI).

Cette interférence du soufre inorganique avec le métabolisme du cuivre est classique (176) et elle n'est marquée que si le taux de molybdène est suffisant (> 0,2 ppm) (132, 133).

Par conséquent, lors d'utilisation d'une telle ration il convient de modifier un peu les normes proposées par l'A.R.C. (I) et de porter le taux de cuivre à 14 - 15 mg/kg MS chez les bovins et 10 - 14 ppm chez les ovins (Tableau L) tout en veillant à maintenir les apports énergétique et azoté à un niveau convenable, de façon à orienter le métabolisme des microorganismes du rumen vers la synthèse d'acides aminés soufrés et non vers la forme de sulfure qui précipite le cuivre.

Ces niveaux d'apport en cuivre proposés pour les ensilages de maïs enrichis en soufre par le complément minéral, peuvent être adoptés pour les rations riches en foin pailleux ou contaminées par la terre (108). Certains fourrages déshydratés sont pollués par le soufre des fuels utilisés et donc à considérer comme riches en soufre (114).

a.4 - Cas des jeunes en régime lacté

Nous savons que des carences en cuivre peuvent survenir sur les jeunes animaux recevant du lait ou un aliment d'allaitement.

Les besoins de ces jeunes ruminants sont assez mal connus. Cependant les recommandations proposent des teneurs allant de 5 à 10 mg cuivre/kg MS (107).

La digestibilité du cuivre chez le jeune étant élevée, il importe de ne pas dépasser notablement 10 mg/kg MS dans la ration : l'intoxication pourrait apparaître assez rapidement.

b - Le seuil de toxicité

Le cuivre est susceptible de s'accumuler dangereusement dans les tissus (foie surtout) lorsque la ration comporte un excès. Le seuil de toxicité est variable suivant la ration, les autres éléments présents et ne constitue pas une limite précise.

Les bovins sont assez résistants à la toxicité du cuivre. Sur des animaux adultes les risques existent à partir de

100 ppm de cuivre dans la ration (XV, 114). Les jeunes bovins sont plus sensibles et des accidents sont à craindre pour des teneurs de 40 à 100 ppm de cuivre (Tableau L).

Les ovins sont les plus sensibles à l'intoxication chronique par le cuivre. Généralement le seuil de toxicité se situe vers 25 à 30 ppm (109). Cependant, dans le cas d'une ration très pauvre en molybdène (0,1 - 0,2 ppm Mo/MS) ce seuil est abaissé à 15 ppm (XV, Tableau L).

Il importe donc d'être très prudent dans l'ajustement de la ration en cuivre chez ces animaux, les apports proposés et le seuil de toxicité étant assez proches.

Même si les besoins en cuivre ne sont pas parfaitement estimés, les normes alimentaires recommandées constituent un équilibre qu'il est primordial de respecter. Il devient actuellement important d'insister sur les dangers de dépasser notablement ces normes :

- la plupart des oligoéléments interfèrent entre eux et l'excès de l'un risque de perturber le métabolisme d'un autre,

- l'excédent en cuivre peut être rapidement mortel pour les ovins, ou provoquer une atteinte hépatique susceptible de compromettre l'avenir zootechnique des animaux. En ce sens il convient de surveiller étroitement certains aliments destinés aux jeunes en croissance et anormalement enrichis en cuivre.

- Enfin, il n'est jamais intéressant de surcharger les mécanismes d'excrétion des animaux déjà très sollicités par ailleurs.

SYMPTÔMES DES CARENES EN OLIGO ELEMENTS CHEZ LES RUMINANTS														
	FER		CUIVRE		COBALT		IODE		MANGANESE		ZINC		SELENIUM	
	A*	J*	A*	J*	A*	J*	A*	J*	A*	J*	A*	J*	A*	J*
DEFICIT DE CROISSANCE OU D'ENGRAISSEMENT		•	•	•	•	•		•	•	•	•	•		
CHUTE PRODUCTION DU LAIT			•		•		•				•			
INAPPETENCE	•		•	•	•	•	•	•			•	•		
PICA			•	•	•	•								
CACHEXIE			•	•	★	★					•	•		
ANEMIE	•		•	•	•	•								
DEFAUT D'PLOMB			•	•					★	★	•	•		
FRACTURES SPONTANÉES			•	•										
BOITERIE			•	•					•	•	•	•	•	
TROUBLES CARDIAQUES			★	★									•	
DYSPEE			•	•									•	
DIARRHÉE					•	•								
DECOLORATION DES POILS			★	★										
POILS PIQUÉS			•	•	★	★		•			•	•		
PELAGE								•			★	★		
DERMITES											★	★		
GOÏTRE							★	★						
INFÉCONDITES			•		•		•		•		•			
DÉFORMATION DES SABOTS											•	•		
DÉGÉNÉRESCENCE MUSCULAIRE														★

* A = Adultes J = Jeunes ★ = Symptômes multiples

Tableau LII : Symptômes des carences en oligoéléments
chez les Ruminants

C - PATHOLOGIE LIEE AU CUIVRE CHEZ LES RUMINANTS

=====

1 - Etude clinique de la carence en cuivre

a - Les symptômes

En raison de l'étendue du rôle biochimique du cuivre, les symptômes de carence sont multiples et divers. Mais ils ne sont qu'exceptionnellement spectaculaires : en cas de carence les voies métaboliques dépendant des systèmes enzymatiques sont ralenties mais rarement bloquées, et des voies "de secours" peuvent plus ou moins pallier le système déficient. En règle générale, les symptômes sont plus graves chez les jeunes de moins d'un an (veaux, agneaux), moins graves chez les sujets de 2 ans et moindres encore chez les adultes.

Le profil général de la carence en cuivre est résumé dans le tableau LII (109).

- Les jeunes bovins et les jeunes ovins qui souffrent de carence en cuivre subissent un retard de croissance grave (14, 35, 117, XV) accompagné d'un déficit d'engraissement. Allcroft (1) décrit des génisses de deux ans qui paraissent âgées de 8 - 10 mois.

- Anémie : elle survient chez les malades de façon inconstante et signe une carence grave. Elle affecte surtout les jeunes où elle est hypochrome et microcytaire. Sur les bovins et les ovins adultes elle est hypochrome et macrocytaire (XV).

En dehors de ces symptômes communs il y a lieu de distinguer les bovins et les ovins.

a.1 - Chez les bovins

a.1.1 - Altération de l'appétit

L'inappétence qui apparaît interesse surtout la partie fibreuse de la ration ; elle est progressive. Les concentrés acceptés au début de l'évolution sont ensuite refusés (108). D'après Havre, Dynna et Ender (84) ce signe est constant. Au pâturage les animaux restent inactifs, broutant de temps en

temps. L'inappétence est nettement plus rare sur les jeunes au lait que sur les animaux âgés.

Le Pica n'est pas spécifique ; il conduit les animaux à ingérer toutes sortes de déchets, à lecher les murs.

La cachexie ou maigreur extrême survient progressivement, à un stade plus avancé.

a.1.2 - La lactation est toujours diminuée, plus ou moins suivant la perte d'appétit. Mais ce déficit reste très difficile à estimer en l'absence d'animaux témoins.

a.1.3 - Les troubles osseux sont variés et peuvent être rattachés à d'autres carences en oligoéléments (Zn, Mn).

- Les défauts d'aplomb apparaissent surtout sur les jeunes. Ils se traduisent par un élargissement des tables articulaires (tarse notamment) et par un gonflement des extrémités distales des métatarsiens et des métacarpiens (14, 35, 171). Le jarret, le genou, le boulet sont noueux, cerclés par un tissu osseux de prolifération.

- Les os sont fragilisés et il existe une fréquence anormale des fractures spontanées intéressant les os longs (fémur, humérus, canon) (XV). Ces fractures sont toujours d'origine mécanique, mais elles ne doivent pas être sous-estimées : leur taux élevé doit attirer l'attention du clinicien. De tels accidents sont décrits sur les moutons (XV).

- Ces divers signes osseux sont accompagnés de boiteries généralement bénignes. On note une certaine raideur de l'allure sur ces bovins pouvant aller jusqu'à la démarche "à l'amble", les deux membres d'un même côté étant déplacés simultanément et parallèlement (35, 109).

a.1.4 - Les troubles cardiaques sont fréquents et se reconnaissent à la présence de pulsations sur la jugulaire, elle-même anormalement tendue (109).

Dans quelques cas l'atteinte cardiaque grave provoque une mort brutale sans signe prémonitoire : ce phénomène existe

en Australie sous le nom de "falling-disease" (XV), en Floride.

Les troubles cardiaques s'accompagnent fréquemment d'accidents congestifs pulmonaires, mammaires et podaux ; dans ce cas la dyspnée à l'effort n'est pas rare ; la pseudo-fourbure se traduit par un piétinement incessant (109).

a.1.5 - Modifications du poil

Chez les adultes comme chez les jeunes une décoloration des poils apparaît (XV). Cette décoloration est surtout visible sur les animaux de race pie noire ; elle se localise à la périphérie des taches noires et habituellement autour des yeux et du mufle. Le poil noir devient rousseâtre ; dans certains cas il forme des plages blanches variables (19, 109).

Dans les races de couleur fauve, le poil pâlit et prend une teinte jaunâtre incertaine. Les zones atteintes sont plus ou moins aisées à reconnaître et forment des "lunettes", une frange ou une plage claire (19).

Ce symptôme est le plus caractéristique mais s'atténue souvent en automne (109).

Parallèlement, le poil est modifié : il devient rude, rugueux, plus ou moins hérissé en tous sens. Sur les veaux il est piqué et terne.

a.1.6 - Troubles de la reproduction

L'infécondité peut être associée à la carence en cuivre, mais cet oligoélément n'intervient pas au premier rang (28, 156).

Lorsque le cuivre est en cause, l'oestrus est discret (XV) et le cycle oestral allongé à 24 jours chez la vache (156).

Certains avortements tardifs sur les brebis sont produits par des régimes carencés en cuivre (128, 185).

a.1.7 - Diarrhée

La carence primaire en cuivre ne provoque pas de diarrhée (XV) ; celle-ci est relativement spécifique d'une carence secondaire par excès de molybdène (1, 47, 84, 193).

En Grande Bretagne elle est connue sous le nom de "teart", et sous le nom de diarrhée des tourbières, "peat scour" en Nouvelle Zélande, en Californie, et au Canada (XV).

Dans les conditions naturelles, cette affection se développe sur des pâturages contenant plus de 5 mg Mo/kg et un taux de cuivre subnormal, et de 20 à 100 mg Mo/kg dans les zones où l'endémie est plus sérieuse. Elle touche essentiellement les bovins (vaches laitières et jeunes surtout) et plus rarement les ovins, moins sensibles à l'intoxication molybdique (XV, 193).

La diarrhée apparaît 8 à 10 jours après que les animaux aient été placés sur la pâture toxique, le temps que les réserves tissulaires en cuivre s'épuisent. Les sujets évacuent des excréments aqueux jaunâtres, verdâtres ou noirs, généralement sans odeur particulière, sans effort. Suivant le taux de molybdène ingéré, la diarrhée peut être bénigne, périodique, ou au contraire profuse, persistante et provoquer la cachexie et même la mort. D'après Allcroft (1) cette diarrhée est favorisée par la réduction d'ingestion d'eau.

a.2 - Chez les ovins

Le tableau clinique est plus réduit mais plus spécifique.

a.2.1 - L'ataxie enzootique : cette affection, fréquente en Australie sur les jeunes agneaux, a été rattachée à une carence en cuivre primaire ou induite (21). Elle se caractérise par une incoordination des mouvements (ataxie), l'animal écartant les membres pour augmenter son polygone de sustentation, titubant sur ses membres postérieurs surtout lorsqu'il se déplace, ou gardant une attitude de "chien-assis" (189). Dans les formes plus graves la paralysie flasque des membres postérieurs gagne aussi les membres antérieurs.

Certains agneaux meurent dès la naissance ou sont totalement paralysés d'emblée (XV).

Dans tous les cas l'appétit n'est pas modifié (XV). Deux types d'ataxie enzootique existent (13) : une forme congénitale qui apparaît dès la naissance, la plus fréquente, et une autre survenant après un temps de latence de 6 à 8 semaines.

Cette ataxie (Sway-back des anglo-saxons) sévit plus tôt que la dégénérescence musculaire, et constitue le symptôme le plus caractéristique de la carence en cuivre.

L'évolution est variable suivant la gravité des lésions. Les animaux peu affectés ont une croissance quasi normale : ils présentent seulement un léger retard dans le développement musculaire d'où une baisse de la qualité de la carcasse. Les sujets plus gravement touchés sont paralysés et ne peuvent s'alimenter, ce qui conduit à un grave déficit de croissance ou à la mort (189). Les mêmes signes existent sur les chevreaux et plus rarement sur les veaux (47).

a.2.2 - Modifications de la toison

La décoloration de la laine apparaît par endroits autour du nez, des yeux ; la laine noire devient grisâtre. Le processus de pigmentation est tellement sensible à la carence en cuivre sur les ovins, que la laine peut montrer des alternances de bandes pigmentées et claires (XV).

La laine devient raide, sa résistance et son élasticité diminuent. Mais surtout elle perd ses ondulations : ce symptôme plus net sur les Mérinos que sur les races anglaises, est assez spécifique. Il faut cependant que la carence ait duré un temps suffisant pendant la pousse de la laine (XV).

En plus de cette baisse de qualité il est signalé une baisse de quantité de la toison (173).

b - Les lésions

Au contraire des symptômes les lésions sont peu nombreuses et le plus souvent discrètes.

b.1 - Lésions osseuses

Elles concernent surtout les extrémités distales des métacarpiens et métatarsiens. Le cartilage de croissance présente des zones élargies irrégulièrement.

L'épiphyse est élargie et il apparaît une couronne osseuse au niveau de la métaphyse.

Au microscope le cartilage croît normalement mais sans ossification ; les colonnes osseuses de l'os spongieux sont amincies (171).

Par ailleurs, les os fragilisés sont normaux en apparence mais présentent un certain degré d'ostéoporose (XV).

b.2 - Lésions cardiaques

Quelquefois le cœur est hypertrophié (XV). Le muscle cardiaque manque de tonus, il est flasque ; les parois internes des ventricules sont pâles, striées ou tachetées (19). Il peut exister des pétéchies à la surface du myocarde.

L'atrophie du myocarde avec remplacement par du tissu fibreux dense est progressive et peut évoluer sur plusieurs années : elle peut ainsi concerner quelques cellules seulement ou de larges zones (XV).

La rupture de l'aorte, fréquemment rencontrée sur les poulets, et les porcs n'est jamais décrite sur les bovins (XV).

b.3 - Lésions du système nerveux

Elles correspondent à l'ataxie enzootique et ce sont les plus spécifiques.

b.3.1 - Les lésions macroscopiques ont été décrites par Innes et Shearer (93).

A l'ouverture du crâne, le liquide céphalorachidien paraît très abondant et les espaces sous-arachnoïdiens dilatés. Le cerveau semble turgescent et ses circonvolutions sont atténuées ; le cortex est réduit à une mince couche de tissu.

A la loupe on constate que la substance blanche a plus ou moins disparue, laissant des cavités remplies de liquide gélatineux. La substance grise est intacte autour de ces cavités.

D'après Barlow (11, 13), ces lésions de cavitation n'apparaissent que dans les cas extrêmes.

b.3.2 - Les lésions microscopiques sont constantes. Elles consistent en une démyélinisation des fibres nerveuses, dans le tronc cérébral et la moelle épinière surtout ; les gros neurones présentent des images de chromatolyse avec perte progressive des lysosomes et formation d'agglomérats de Golgi (11, 13) ; la dégénérescence des neurones est nette dans le noyau rouge (11) ainsi que dans les cornes ventrales de la moelle épinière (13).

b.3.3 - Sur le plan histochimique les concentrations en cuivre dans le cerveau des agneaux ataxiques sont faibles (< 3 mg/kg MS) (XV). L'activité cytochrome oxydasique est très réduite dans les cellules nerveuses altérées (11) principalement dans les neurones moteurs du noyau rouge et des cornes ventrales de la moelle épinière (65).

c - Pathogénie

L'intervention du cuivre dans les nombreux processus enzymatiques explique les symptômes et les lésions observés en cas de carence (Tableau LIII) ; le rendement de certaines voies métaboliques est abaissé.

- La diminution de l'activité du système cytochrome-oxydase est la cause de nombre de lésions ou symptômes. Elle explique la chute de croissance, l'amaigrissement, la cachexie et la perte des poils. L'oxydation des différents substrats devient ralentie ou nulle et, en carence aiguë, les mitochondries n'accomplissent pas leur rôle ; leur renouvellement s'en trouve gravement accru et leur vieillissement accéléré (IV).

TABLEAU LIII : Pathogénie de la carence en cuivre

Carnes 1971 - Lamand 1975

Enzyme ou système enzymatique impliqué						
	Cytochrome oxydase	Céruлоplasmine	Système complexe + cuivre	Polyphénol oxydase = tyrosinase	Céramide Galactosyl transférase	Lysine et amine oxydase
Voie métabolique inhibée	Oxydation des substrats du cycle de Krebs	Oxydation du Fe++ en Fe+++ et passage sur la sidérophiline	Synthèse de la kératine (oxydation des groupements sulphydryles)	Synthèse de mélanine	Synthèse des phospholipides, de cérébroside et de myéline	Oxydation des amines & des lysines
Symptômes correspondants	ralentissement de croissance, amaigrissement, troubles cardiaques, anémie	diminution du taux de myoglobine, anémie	altération du poil et de la laine	décoloration du poil	demyélinisation: troubles nerveux	anomalies de l'élastine et du collagène, de la matrice protéique osseuse; troubles osseux et vasculaires

- l'anémie s'explique par une baisse de l'activité ferroxidase de la céruloplasmine (173). Le fer stocké sous forme de ferritine ne peut être correctement libéré et participer à la formation d'hémoglobine.

- les modifications du poil et de la laine : la décoloration est liée à un manque de production de mélanine par suite de l'inhibition de la tyrosinase. Les altérations de structure de ces phanères sont expliquées par la baisse d'oxydation des groupements sulfhydryles de la prékératine. Par suite les ponts disulfures de la kératine sont formés anormalement dans le temps et dans l'espace (173).

- Les troubles osseux sont liés à la perturbation dans la synthèse du collagène. La lysine oxydase ne permet pas une stabilisation suffisante des protéines de la trame osseuse (33). La minéralisation est normale (XV), mais réalisée sur une matrice lâche elle conduit à de l'ostéoporose. L'activité de cette enzyme reste suffisante, même en cas de carence marquée, chez les ruminants, pour assurer une cohésion quasi normale de l'élastine (173) : ceci explique que la rupture des gros vaisseaux n'apparaisse pas dans ces espèces.

- les troubles cardiaques résultent de la conjonction de plusieurs causes (19) : la diminution de l'activité de la cytochrome oxydase joue un rôle prépondérant dans les troubles métaboliques du coeur ; l'activité respiratoire s'en trouve réduite ; de plus la concentration en myoglobine est également réduite. L'irrigation du coeur par un sang pauvre en hémoglobine augmente le déficit du transport d'oxygène.

- la myélinisation défectueuse du système nerveux central sur les jeunes animaux ataxiques apparaît comme le résultat de la défaillance de deux systèmes enzymatiques (XV) : la faible teneur en cuivre du cerveau conduit à une déficience de l'activité cytochrome oxydase des neurones moteurs responsable de l'inhibition plus ou moins complète du métabolisme aérobie de ces cellules (11,65) ; par ailleurs la synthèse des phospholipides du tissu nerveux (myéline, cérébroside) est perturbée par la baisse de l'activité de la céramide-galactosyl transférase (XV, 112).

L'extrême sensibilité des moutons semble liée au processus de myélinisation rapide en fin de gestation et à la possibilité qu'ils ont d'être aisément carencés en cuivre in utero et à la naissance (XV).

- La diarrhée est mal expliquée. Underwood (XV) pense que l'excès de molybdène par rapport au cuivre perturbe l'activité microbienne dans le tractus gastrointestinal ; en effet aucune inflammation ou lésion des intestins n'apparaît dans ce type de diarrhée. Ou bien résulte-t-elle de la formation de thiomolybdate dans le rumen ? L'effet curatif du sulfate de cuivre serait alors lié à l'apparition de complexe insoluble thiomolybdate cuprique (193).

2 - Etude clinique de la toxicité chronique du cuivre

Le cuivre, comme certains autres métaux lourds, donne lieu à deux formes d'intoxication :

- l'intoxication aiguë est rare ; elle suit l'ingestion accidentelle d'une quantité importante d'un composé à base de cuivre (fongicides, molluscicides, antiparasitaires, produits phytosanitaires ...) et s'accompagne des symptômes classiques de toxicité d'un métal corrosif : gastroentérite avec diarrhée profuse verte ou bleue plus ou moins hémorragique, déshydratation et éventuellement mort (189).

- l'intoxication chronique, cumulative (ou chalcose) est fréquente et ne se manifeste qu'au bout d'un certain délai variable. Elle peut apparaître chez les bovins (veaux surtout) mais ce sont les ovins qui paient le plus lourd tribut en raison de leur sensibilité esquisse.

a - Etiologie

L'intoxication chronique avec le cuivre reconnaît trois grandes circonstances d'apparition :

- intoxication cuprique primitive : lorsque le taux de cuivre dans la ration est très supérieur aux besoins de l'animal : ainsi sur certains sols cuprifères d'Australie quelques variétés

de fourrages peuvent atteindre des concentrations de 50 à 60 mg Cu/kg MS (XV) ; en France, hormis d'éventuelles pollutions industrielles ou agronomiques, ce cas n'existe pas (20), mais la distribution à des moutons d'aliments concentrés industriels surdosés, ou de composés destinés à des porcs ou des bovins et riches en cuivre, reste une erreur trop souvent rencontrée (109).

- Intoxication cuprique secondaire : lorsque le taux de cuivre dans la ration paraît normal mais que celle-ci est très pauvre en facteurs susceptibles de diminuer son absorption et (ou) sa rétention : molybdène et sulfates en particulier (XV, 189) et à un degré moindre calcium, zinc, protéines (XIV).

- Enfin certaines plantes, contenant des alcaloïdes hépatotoxiques, peuvent conduire à une intoxication chronique par le cuivre dite hépatogène : l'héliotrope (*Heliotropium europaeum*, *H. dasycarpum*) est la principale (XV, 189), mais les Sénéçons (*Senecio* sp.) (189) et les lupins (XV) ont une action similaire. Leurs principes actifs détruisent certaines cellules hépatiques et provoquent une accumulation du cuivre dans le foie dépassant souvent 1000 mg/kg MS.

b - Symptômes

Les signes cliniques, identiques chez les bovins et les ovins sont regroupés en deux phases.

- Durant la phase pré-hémolytique le cuivre en excès s'accumule, essentiellement dans le foie et les reins (126). Le temps de latence varie de quelques semaines à un an ou plus suivant le niveau du déséquilibre alimentaire. Au cours de ce délai l'animal ne présente aucun symptôme de toxicité et paraît normal (189) ; seule une baisse de croissance peut survenir un mois environ avant la crise hémolytique (186).

- La crise hémolytique survient brutalement : l'animal est abattu, hébété, présente de l'anoréxie et une hyperthermie, accompagné d'une soif excessive (186, 189). Les muqueuses (conjonctive, muqueuse buccale) et la sclérotique prennent une teinte ictérique caractéristique, jaune foncé. Parallèlement

les urines deviennent troubles, rougeâtres ou "marc de café", car elles sont chargées d'hémoglobine (186, 191). Nous sommes donc en présence d'un ictère hémolytique marqué. Les sujets meurent en deux à quatre jours généralement, certains (moutons Mérinos) pouvant présenter deux ou trois épisodes hémolytiques avant de succomber (189).

c - Lésions

c.1 - Lésions macroscopiques

La carcasse présente un ictère généralisé : la coloration jaune se retrouve au niveau du tissu conjonctif sous-cutané, des fascias intermusculaires, des séreuses, dans la paroi des gros vaisseaux et dans la graisse péricardique (189, 191).

Le sang coagule mal, il est marron (méthémoglobinémie).

Les organes (poumons, rate) sont congestionnés ; certaines petéchie apparaissent à la surface du coeur (186).

Le foie est soit hypertrophié et jaune éclatant, soit friable et sombre.

Les lésions du rein sont les plus caractéristiques (189) : l'organe est hypertrophié, marron foncé et la capsule présente un reflet métallique ; à la coupe le cortex et la médulla ne sont pas discernables en raison de l'accumulation des produits du catabolisme de l'hémoglobine.

c.2 - Lésions microscopiques

Elles sont nettes dans le foie et les reins.

Le foie présente des foyers de nécrose centrolobulaire (189) et dans quelques cas une dégénérescence graisseuse des hépatocytes (186). Les cellules de Kupffer et les cellules inflammatoires sont nombreuses (126).

Les reins montrent une nécrose des tubules urinaires (T.C.P.) ceux-ci sont obturés par des dérivés de l'hémoglobine ou par des fragments d'érythrocytes (189).

c.3 - Histochimie

- Pendant la phase d'accumulation la cuprémie reste constante ; elle ne commence à s'élever que 24 heures avant l'apparition des signes cliniques ; parallèlement on note une augmentation du taux de méthémoglobine et un début d'hémolyse des hématies (189, 190, 191).

Dans le sérum sanguin les activités GOT - GPT (transaminases glutamiques oxalacétique et pyruvique) et LDH (lactico deshydrogénase) augmentent dans un délai de 6 à 1 semaines avant la crise hémolytique (78, 131, 190, 191) : la détermination de ces enzymes (surtout SGOT) est le seul test pouvant conduire à un diagnostic précoce d'empoisonnement chronique du cuivre (131).

Le cuivre hépatique augmente régulièrement et dépasse le seuil critique des 800 - 1000 mg Cu/kg MS (XV).

- Au moment de la crise hémolytique le cuivre sanguin est considérablement augmenté (5 à 20 fois les valeurs normales) ; l'hémoglobine et le glutathion (GSH) des globules rouges s'effondrent tandis que le taux de méthémoglobine s'élève (190, 191). Enfin le taux de CPK (créatine phosphokinase) dans le sérum est brutalement augmenté et retourne rapidement à la normale si le sujet survit à la crise : des lésions musculaires doivent avoir lieu mais elles n'ont pas été étudiées à ce jour (126).

d - Pathogénie

Les premières microlésions du foie et du rein se développent au cours de la phase d'accumulation : nécrose de certaines cellules parenchymateuses, cellules de Kupffer hypertrophiées chargées de cuivre, concentration des lysosomes dans les cellules du tube contourné proximal (126). La saturation du parenchyme hépatique, son délabrement ou l'action de certains stress (changement brutal de régime, transport, tonne...) conduisent à la libération, dans le torrent circulatoire de larges quantités de cuivre ainsi que de certains composés

cellulaires mal identifiés. Il s'ensuit une hémolyse brutale, intense, avec hémoglobinémie et méthémoglobinémie, responsable de l'ictère.

Les lésions rénales résultent de l'effet conjugué des produits de dégradation des hématies et de l'hypercuprémie (126).

D - DIAGNOSTIC DE LA CARENCE EN CUIVRE

=====

Le diagnostic de carence représente une difficulté majeure pour les vétérinaires praticiens. Pour parvenir à un résultat fiable le maximum de données doit être recueilli.

1 - Les commémoratifs

Ils constituent une source d'information importante pour le praticien, quoique non décisive ; car ils représentent, avec l'étude clinique, les seuls renseignements immédiatement exploitables, permettant ainsi la mise en oeuvre rapide de méthodes palliatives spécifiques.

- L'alimentation des ruminants repose largement sur les productions locales et dépend donc des conditions agronomiques (sol-plante) du lieu d'élevage ; leurs rapports avec les carences animales ont été amplement développés dans les chapitres I et II.

* Les données géochimiques nous révèlent l'existence de certaines roches ou de certains types de sol susceptibles de donner des fourrages pauvres en cuivre, et conduisent à la localisation géographique des "aires de carence probable " (carte figure 2).

* La connaissance des teneurs habituelles des fourrages d'une région (20) et des nombreux facteurs modifiant ces teneurs permet de mieux cerner le problème des carences en cuivre.

L'accumulation de toutes ces données agronomiques sert à définir les potentialités de carence d'une région et à orienter le diagnostic.

- Enfin l'existence de carences survenues antérieurement (120, 153) et leur répartition (carte figure 11) sont un élément supplémentaire de base du diagnostic. L'expérience personnelle du vétérinaire permet de dégager quelques règles de conduite.

2 - Le diagnostic clinique

Il est toujours délicat à poser. Les symptômes décrits correspondent à la somme de ce qui peut être rencontré, mais ils n'existent jamais simultanément sur un même animal (35) ; le clinicien doit s'efforcer d'en retrouver la majorité au niveau d'un grand troupeau ou d'un village.

Même dans une zone d'endémie, seuls quelques animaux sont atteints : les autres paraissent normaux (141).

Tous les degrés de carence existent et en zone de sub-carence le comportement individuel prend toute son importance ; les symptômes sont atténués et disparaissent même à la limite ; seul persiste un niveau de production faible difficile à apprécier.

De plus, les dominantes symptomatiques varient d'un pays à l'autre, d'une région à l'autre : dans certaines zones les troubles osseux dominant, dans d'autres ce sont les modifications du poil, ou les troubles cardiaques... (XV).

Enfin beaucoup de ces symptômes ne sont pas spécifiques et peuvent relever de carence en d'autres oligoéléments (Tableau LII), en énergie, en azote ou en phosphore, de causes parasitaires, infectieuses.

Chez les bovins la décoloration du poil et la présence de troubles cardiaques en série doit faire penser à la carence en cuivre. Quant aux déficits de production (croissance, lactation, reproduction) ils ne peuvent être attribués à la carence en cuivre qu'accompagnés d'autres symptômes.

Chez les ovins l'ataxie enzootique est spécifique de la carence en cuivre. Mais il faut éliminer les causes toxiques ; la myopathie survient plus tard et s'accompagne de

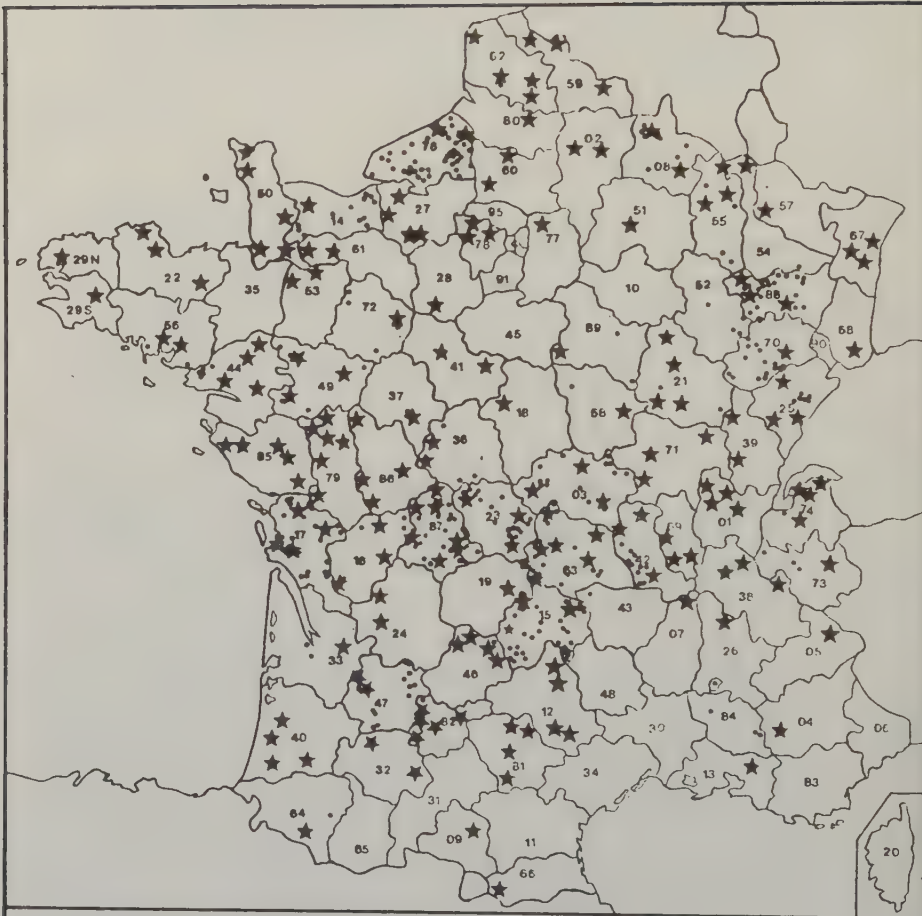


Figure 11 : CARENCE EN CUIVRE ET EN COBALT (FRANCE)

- ★ ENQUETE VETERINAIRES : Elevages carencés dans la clientèle
- ENQUETE ELEVEURS : Elevage carencé

paralysie spastique (= raide de l'agneau). Les modifications de la toison sont à rechercher, surtout la perte d'ondulation de la laine sur certaines races.

Il est important d'arriver à une suspicion de carence bien étayée : de la précision du diagnostic clinique dépend l'organisation du diagnostic analytique et par suite la rentabilisation des dépenses engagées.

3 - Le diagnostic nécropsique

Il est en général peu utile ; les lésions sont discrètes et il faut avoir recours à l'histologie pour les préciser.

4 - Le diagnostic analytique

Il peut être entrepris à différents niveaux avec plus ou moins de précision (Tableau LIV).

a - Au niveau du sol

L'analyse en cuivre total peut permettre de dépister des carences aiguës ou au contraire de larges excès (39, 129, 141). L'analyse de la "fraction assimilable" est un problème complexe (51, 147) et ne peut servir que dans quelques cas particuliers à la définition de carences végétales (39, 129). Mais nous l'avons vu, les relations existant entre les taux de cuivre du sol et de la plante, et à plus forte raison entre le sol et l'animal, ne sont que très lâches ; il s'ensuit que si de telles analyses sont utilisables à petite échelle (au niveau des régions de carence) dans un but de prospection agronomique, elles sont inapplicables actuellement au niveau d'une exploitation pour confirmer une suspicion de carence sur l'animal.

TABLEAU LIV : Diagnostic analytique de la carence en cuivre

	limite de carence	valeurs habituelles	Causes d'erreur	valeur du diagnostic
fourrages mg/kg MS	7	3 - 6	terre, engrais, poussière	++
Plasma µg Cu/100 ml	70	80 - 120	contaminations > 150 - 200 maladie infectieuse ou inflammation > 120 - 150	++
Céruleoplasmine µg Cu/100 ml	70	80 - 120	non sensible aux contaminations maladie infectieuse ou inflammation > 120 - 150 putréfaction du plasma < 70	+++
Foie mg/kg MS	20 - 30	50 - 200		++
Poils µg/g	7	8 - 15	contaminations (excrements)	+

b - Au niveau de l'alimentation

Habituellement la ration des ruminants se divise en trois parties : la partie fibreuse ou ration de base, les concentrés distribués en fonction des productions et le complément minéral vitaminé. Or nous avons vu que les carences se dessinaient au niveau de la ration de base, la plus importante quantitativement.

Les aliments concentrés ont généralement une teneur convenable, soit par l'apport de tourteaux riches en cuivre, soit par l'incorporation de minéraux à la fabrication. Il revient donc au complément minéral vitaminé de corriger les déficits en cuivre existants dans la ration.

b.1 - Examen de la ration

Avant d'entreprendre une analyse de laboratoire il est préférable d'apprécier la ration en fonction de ses composants. En particulier il importe de savoir si un complément est distribué, à quelle dose et si il contient des oligoéléments (110) ; sa composition en minéraux mineurs peut être marquée sur l'étiquette, demandée au fabricant ou même déterminée par un laboratoire.

b.2 - Analyse des principaux fourrages

b.2.1 - Nature du prélèvement

Il est intéressant d'analyser les foins ou aliments grossiers (racines exclues) entrant pour plus de 30 p.100 dans la ration de base (110).

Dans la majorité des cas il s'agit de foins de prairie naturelle, de prairie temporaire ou d'ensilage.

b.2.2 - Mode de prélèvement

Afin d'obtenir des résultats exploitables il convient de réaliser un prélèvement représentatif et exempt de contaminations (terre, engrais, poussières ...) (17, 80).

- Les fourrages seront prélevés en différents points du fenil sans tirer sur les poignées pour ne pas séparer tiges et feuilles. A partir d'un premier échantillonnage de plusieurs kilos on reprend un prélèvement de 500 g environ que l'on place en sac plastique propre.

- Pour l'ensilage le prélèvement s'effectue en différents points avec une sonde réservée à cet usage (17). L'échantillon est séché sur feuille aluminium à l'étuve ventilée (60 - 80° C) et expédié en sac plastique (110).

b.2.3 - Les commémoratifs servent pour l'interprétation des résultats.

Ils doivent porter la nature du prélèvement (foin de prairie naturelle ou temporaire, ensilage, âge et numéro du cycle) sa composition (proportion de graminées, légumineuses, plantes diverses). Enfin le mode de séchage des foins et la nature du sol d'origine complètent cette liste.

b.2.4 - Analyses

Le dosage du cuivre s'effectue par spectrométrie d'absorption atomique après minéralisation par voie humide (17).

Le molybdène est dosé par colorimétrie au thiocyanate après minéralisation par voie sèche (17).

Des précautions extrêmement sévères doivent être prises et ces analyses requièrent un personnel expérimenté. Le nombre des analyses doit être limité : le cuivre, le zinc et le manganèse sont aisément dosés ensembles à partir d'un même échantillon ; le dosage du cobalt est long et coûteux comme celui du sélénium ; quant à la détermination du molybdène (ou des sulfates) elle peut être entreprise dans certains cas particuliers (110).

b.2.5 - Interprétation

Lorsque les résultats d'analyses donnent des valeurs inférieures au seuil de carence (Tableau L et LIV) celle-ci est quasi certaine. Mais si les teneurs sont supérieures à ce

seuil on ne peut en aucun cas conclure à une absence de carence (80) : le passage plante - système enzymatique comporte une notation de rendement (digestibilité - rétention) et un certain nombre d'éléments interférents peut modifier le métabolisme. Une teneur "normale" de la ration n'est pas une garantie d'un apport suffisant à l'animal.

En résumé, les analyses d'aliments permettent de juger des apports d'oligoéléments à tout un troupeau et présentent donc le meilleur rapport prix-prestation. Cependant elles nécessitent une méthodologie rigoureuse, des laboratoires très qualifiés et ne doivent pas conduire à des interprétations trop hâtives.

c - Les dosages plasmatiques

Le sang peut servir de support au diagnostic analytique. Mais il ne traduit de carence en cuivre que lorsque l'animal a, au moins partiellement, épuisé ses réserves hépatiques, c'est-à-dire en cas de carence déjà grave (56,132).

c.1 - La cuprémie

Le cuivre peut être dosé dans de bonnes conditions dans le plasma dans la mesure où le prélèvement n'est ni contaminé, ni hémolysé, ce qui impose certaines précautions.

c.1.1 - Mode de prélèvement

Le sang (10 ml) est prélevé à la jugulaire par écoulement avec des aiguilles en inox. Il est repris dans un tube plastique chimiquement propre et sec contenant deux gouttes d'héparine, et mélangé à l'anticoagulant par retournement du tube une ou deux fois (110).

Le prélèvement est effectué sur 5 à 10 animaux suspects et le nombre d'animaux sains correspondant ; en cas de sondage prélever sur 10 p. 100 des animaux environ (18).

Pour éviter toute hémolyse, les échantillons doivent

être centrifugés (5 mn à 3000 g environ) sur place à la ferme ; éventuellement les tubes de sang peuvent être placés au bain de glace (1 heure maximum) pour centrifugation au laboratoire (110).

Après centrifugation, le plasma est repris par pipetage sans hématies et stocké au réfrigérateur dans des tubes plastiques hermétiquement bouchés, chimiquement propres et secs (18).

c.1.2 - Les échantillons de plasma sont identifiés par étiquettes autocollantes et expédiés en express par la poste, de préférence en début de semaine ; ils doivent être accompagnés des fiches de commémoratifs.

c.1.3 - Les commémoratifs mentionnent l'origine du prélèvement : nom et adresse de l'éleveur, identification des animaux prélevés (nom - numéro) et la date du prélèvement.

Le nom et l'adresse du praticien doivent figurer sur les fiches, ainsi que les renseignements cliniques permettant éventuellement un début d'interprétation ou une meilleure organisation des analyses à effectuer.

c.1.4 - Analyse

Le cuivre est dosé par spectrophotométrie d'absorption atomique sur une prise d'essai de 1 ml dilué au 1/5, après précipitation des protéines du plasma. Il est aisé de doser simultanément le cuivre et le zinc. Les résultats sont obtenus par comparaison avec une gamme d'étalons et exprimés en µg Cuivre/100 ml plasma.

c.2 - La céruloplasmine

Nous savons que cette cuproprotéine représente la majeure partie du cuivre circulant et qu'elle possède une activité oxydasique. Le cuivre plasmatique et la céruloplasmine sont liés par une corrélation linéaire à coefficient élevé

($r = 0,80$ à $0,94$) (188) et de nombreux chercheurs se sont penchés sur le dosage enzymatique de la céruloplasmine en vue du diagnostic de la carence en cuivre.

Cette méthode de diagnostic présente de nombreux points d'intérêt (188) :

- les risques de contamination des échantillons sont faibles, la réaction enzymatique utilisée étant spécifique ; même les contaminations avec le cuivre n'interviennent pas sur les résultats.

- la céruloplasmine est stable 5 jours au moins à la température ambiante ce qui permet l'expédition des échantillons sans précautions particulières ; à $+4^{\circ}\text{C}$ le stockage peut durer au moins deux semaines sans modifications d'activité de l'enzyme (XVII).

- la prise d'essai est de 0,1 ml soit 10 fois moins que pour le dosage du cuivre.

- les dosages peuvent être menés en grande série en un temps relativement bref (quelques heures), ce qui permet un dépistage de la carence dans différents troupeaux.

Analyse : le dosage de la céruloplasmine s'effectue par photométrie d'absorption après action de l'enzyme sur un substrat -la p. phénylène-diamine (XVII, 178). Les résultats obtenus (en densité optique) sont transcrits en μg de cuivre/100 ml de plasma par l'équation de la droite de régression entre la céruloplasmine et le cuivre plasmatique (110, 188).

c.3 - Interprétation des résultats

Les valeurs du cuivre plasmatique obtenues directement ou par la céruloplasmine, sont comparées aux limites de carence ; le seuil critique adopté varie suivant les auteurs de $50\text{ }\mu\text{g}/100\text{ ml}$ (3) à $70\text{ }\mu\text{g}/100\text{ ml}$ (130) ; en France la limite retenue est de $70\text{ }\mu\text{g}/100\text{ ml}$, en dessous de cette norme l'animal est considéré comme carencé (16, 110) ; mais pour une cuprémie supérieure on ne peut exclure l'hypothèse d'une carence sans précision supplémentaire (16).

L'interprétation des résultats doit éventuellement tenir compte des causes d'erreur (Tableau LIV) ; en particulier les animaux suspects de maladie inflammatoire ou infectieuse seront écartés (hypercuprémie) ainsi que les animaux fortement parasités (hypocuprémie). Dans certains cas d'atteinte hépatique l'activité de la céruloplasmine est diminuée sans pour autant que l'animal soit carencé.

De plus l'apparition des symptômes cliniques de carence en cuivre et l'existence de teneurs plasmatiques anormalement basses ne sont pas forcément liées sur un même individu (146). Il s'ensuit que, pour permettre une interprétation valable, les résultats analytiques doivent être jugés sur plusieurs animaux d'une même exploitation (8 à 10 bêtes au moins) et assortis de commémoratifs aussi complets que possible ; l'analyse individuelle n'a aucune signification.

Les dosages du cuivre ou de la céruloplasmine dans le plasma constituent deux bons éléments de diagnostic : ils permettent de bien cerner les animaux présentant une carence assez grave (16, 80). La cuprémie est fréquemment utilisée en routine. Le dosage de la céruloplasmine est une méthode plus fiable ; malheureusement, pour être rentabilisée au laboratoire, elle nécessite des quantités importantes d'échantillons ; de ce fait elle représente un outil précieux d'étude systématique à l'échelle d'une région, mais difficile à utiliser au niveau d'une clientèle vétérinaire.

Remarque : certains laboratoires se servent du taux de cuivre dans le sang total comme référence ; sur les animaux sains les teneurs en cuivre dans le sang total ou dans le plasma sont pratiquement identiques ; sur les animaux carencés le cuivre plasmatique est inférieur au cuivre total mais les limites de carence retenues sont sensiblement les mêmes : de 0,6 à 0,7 $\mu\text{g Cu/ml}$ (XV).

d - Les dosages tissulaires

d.1 - Le foie

Il constitue l'organe préférentiel de stockage du cuivre et de ce fait, le meilleur tissu susceptible d'extérioriser une carence. Cependant ce prélèvement a l'inconvénient d'être peu accessible, dans les conditions de la pratique. La biopsie hépatique est réalisable dans des conditions expérimentales mais elle est pratiquement exclue en clientèle.

Par contre le prélèvement post-mortem (décès subit ou abattage) permet un dosage précis et économique.

L'échantillon prélevé est découpé en tranches de 1 cm d'épaisseur et séché à l'étuve (80 - 100° C) sur plateau aluminium, avant expédition au laboratoire ; le cuivre est dosé colorimétriquement après minéralisation de la prise d'essai (300 mg) par voie humide (16).

Le seuil critique pour le cuivre hépatique se situe entre 20 et 30 $\mu\text{g/g}$ de MS. Alexander et Harvey (5) retiennent le chiffre de 30 $\mu\text{g/g}$ de MS. Cuhna et al. (45) notent chez les bovins quelques symptômes lorsque le cuivre hépatique descend en dessous de 75 $\mu\text{g/g}$ MS et des symptômes fréquents si la concentration est inférieure à 25 $\mu\text{g/g}$ MS. Selon Cunningham (47) pour une teneur inférieure à 20 $\mu\text{g/g}$ MS les risques de carence sont grands chez les bovins et les ovins. Il est donc délicat d'adopter un seuil précis valable dans tous les cas : d'après Mills et Dalgarno (137) et Hartmans (80) une telle estimation ne peut se faire qu'après étude sur les animaux dans la zone concernée, et la valeur critique retenue ne peut à priori être appliquée à des animaux d'une autre région.

En France les animaux sont considérés comme carencés pour un taux de cuivre hépatique inférieur à 20 $\mu\text{g/g}$ MS (16, Tableau LIV).

Remarque : Le dosage du cuivre hépatique est indispensable pour confirmer un diagnostic d'intoxication chronique cuprique ; en effet l'ictère hémolytique n'est pas suffisant à lui seul, aussi bien sur le plan clinique que juridique pour poser un diagnostic sûr.

d.2 - Les poils

Le cuivre contenu dans le poil est essentiellement d'origine sanguine ; par suite, les variations importantes du taux de cuivre dans le sang, sous l'influence de l'alimentation, se répercutent au niveau du poil. Sa croissance est lente (1 cm par mois en moyenne) et de ce fait sa composition reflète la nutrition en cuivre pendant la pousse permettant une information retrospective (29).

Par ailleurs le poil est un prélèvement extrêmement facile à obtenir et de conservation illimitée, ce qui constitue deux avantages pratiques considérables.

Toutefois certains points méritent d'être soulignés afin d'obtenir des résultats comparables ;

- les poils sont prélevés de préférence au niveau du corps : ceux-ci muent deux fois par an et permettent de s'affranchir, au moins partiellement, de l'influence de l'âge (29).

- il convient d'éviter les zones souillées : l'échantillon sera donc recueilli en arrière de l'épaule ou sur le thorax.

- la couleur des poils n'influe pas ou très peu sur le taux de cuivre pilaire (29, 50); le prélèvement de poils blancs, dans la mesure où il est possible élimine ce facteur.

Au laboratoire les poils sont triés à la main, dépoussiérés à l'aide d'un aspirateur sur filtre, lavés par une solution de lauryl sulfonate d'ammonium à 4 p.1000 dans l'eau distillée. Puis ils sont abondamment rincés successivement à l'eau distillée et à l'eau permutée et enfin séchés (16).

Le cuivre est dosé par colorimétrie après minéralisation par voie humide, sur une prise d'essai de 1 g.

Le seuil de carence se situe à 7 mg/kg MS (19, 110, Tableau LIV). L'analyse ne permet d'aboutir à une conclusion que si les poils sont nettement en dessous de ce seuil ; pour des teneurs pilaires voisines du seuil l'interprétation est délicate. En raison des variations individuelles importantes, les résultats de l'analyse pilaire ne sont interprétables que

sur des lots d'animaux (29, 146) : comme pour la cuprémie l'analyse individuelle n'a pas de sens.

Le dosage du cuivre hépatique constitue le meilleur élément d'appréciation du bilan cuprique d'un animal ; il représente un critère de diagnostic large permettant d'englober la majorité des cas suspects, mais exclu de la pratique courante.

Par contre le cuivre pileaire permet uniquement de détecter des carences anciennes et profondes, ayant duré toute la pousse du poil et suffisantes pour modifier les teneurs.

e - Les dosages enzymatiques

En dehors du dosage de la céruloplasmine il est possible d'utiliser certaines cuproenzymes.

e.1 - La monoamine oxydase (1.4.3.4) du plasma a été étudiée par Mills, Dalgarno et Williams (139) ; son activité évolue très parallèlement à la cuprémie et ne permet pas un diagnostic plus précis que cette donnée (137).

e.2 - La cytochrome oxydase (1.9.3.1.)

Elle peut être explorée soit après biopsie dans le foie, (159), soit après biopsie musculaire (137).

La biopsie musculaire est plus facile à réaliser que la biopsie hépatique ; elle s'effectue sous anesthésie locale dans le muscle semi-tendineux sur les bovins et dans le muscle semi-membraneux chez les ovins.

Le dosage de la cytochrome oxydase s'effectue par spectrophotométrie d'absorption après action de l'enzyme sur un substrat spécifique, le cytochrome C réduit ; l'addition au substrat de mitochondries hépatiques ou musculaires s'accompagne d'une oxydation de celui-ci ; le niveau d'oxydation du cytochrome C réduit est déterminé par la baisse du pic d'absorption (à 550 nm) (137).

Les résultats, en densité optique, sont convertis en Unité = μ môle de cytochrome C oxydé/minute/gramme de tissu sec.

L'interprétation des résultats reste très délicate en raison du nombre insuffisant des études en ce domaine.

Dans le muscle des veaux normaux l'activité de la cytochrome oxydase est de 200 ± 9 unités (cuprémie $96 \pm 6 \mu\text{g}/100 \text{ ml}$) ; elle s'abaisse à 141 ± 17 unités sur les sujets carencés (cuprémie $25 \pm 5 \mu\text{g}/100 \text{ ml}$) (137).

Dans le foie des animaux normaux cette activité est supérieure à 7 unités. Mais cette limite n'est pas rigoureuse : certains sujets peuvent présenter des valeurs inférieures sans présenter de signes cliniques ; ceux-ci n'apparaissent que si la carence en cuivre dure un certain temps (159).

Le diagnostic de carence basé sur le dosage de la cytochrome oxydase est séduisant à priori : l'activité de l'enzyme a l'avantage de refléter une fonction biochimique du cuivre et d'approcher mieux les conséquences pathologiques. Cependant son exploitation reste délicate à mettre en oeuvre dans les conditions de la pratique, et cette méthode demeure cantonnée au domaine expérimental.

5 - Le diagnostic thérapeutique

Il est peu satisfaisant pour l'esprit, mais dans bien des cas il constitue le seul élément réellement décisif.

La suppression des symptômes par l'administration de cuivre est une preuve suffisante pour admettre la carence. Bien entendu, ce diagnostic, posé au sein d'un effectif, doit comporter des animaux témoins non traités : un résultat positif non confirmé par l'absence de résultat chez les témoins perd toute sa valeur.

Le diagnostic de carence en cuivre chez les ruminants ne peut être posé avec suffisamment de certitude qu'après le recensement et la convergence d'un maximum de données :

commémoratifs, données cliniques et analytiques ; chacune des informations, quelle qu'en soit la source, n'est le plus souvent, pas suffisamment concluante pour être utilisée seule.

Le diagnostic clinique est possible lors de carences aiguës ; mais en cas de subcarences il faut faire appel aux méthodes analytiques faciles à mettre en oeuvre :

- l'analyse de la ration permet d'effectuer un bilan au niveau du troupeau,

- la cuprémie ou mieux le dosage de la céruloplasmine, constitue un critère de diagnostic plus restrictif que le cuivre hépatique. L'analyse pilulaire mériterait une plus vaste exploitation : elle permet un diagnostic un peu plus large que l'analyse sanguine (16). La fiabilité des résultats fournis par le laboratoire est liée à la qualité des prélèvements et au choix des échantillons, à la compétence du personnel et aux soins apportés lors des dosages : il importe donc de s'adresser à un laboratoire indépendant, sérieux et dont les méthodes d'analyses sont standardisées.

Actuellement l'interprétation des analyses n'est possible que sur des lots d'animaux soumis aux mêmes conditions d'élevage : en cas de carence l'une au moins des valeurs est inférieure au seuil.

Peut être que, dans l'avenir, les dosages biochimiques ou enzymatiques seront utilisables en pratique courante, et permettront de juger un animal.

E - PRONOSTIC

=====

1 - Le Pronostic médical

Même en cas de carence aiguë il est bénin sur les bovins, la mort ne survient qu'exceptionnellement, par défaillance cardiaque (XV). Chez les ovins il est plus sérieux car les jeunes atteints de "sway-back" meurent fréquemment.

Le cuivre entre dans l'activation catalytique de certaines voies métaboliques et préside donc à leur efficacité ; mais l'absence de l'oligoélément ne bloque pas totalement ces voies : elle diminue seulement leur rendement et conduit à une baisse de l'efficacité biochimique et zootechnique de l'animal.

2 - Le pronostic économique

Il est variable avec le degré de carence mais toujours assez sérieux.

a - Les pertes économiques indirectes

Elles sont très difficile à chiffrer en raison de l'absence de contrôle des productions, de l'existence de plusieurs causes conjointes.

La diminution des productions, la mauvaise rentabilité d'un cheptel sont les conséquences les plus constantes de la carence en cuivre. L'appétit est modifié (84) et la croissance fortement ralentie (1, 117). La production laitière, la fécondité (XV, 156) et la vitalité des jeunes sont également diminuées.

b - Les pertes économiques directes

Elles sont plus faciles à cerner, mais restent également difficiles à chiffrer car le diagnostic de carence n'est pas souvent posé et les polycarences sont fréquentes.

- Les pertes graves par saisie, mortalité sont rares.

- Les troubles osseux, accompagnés de douleur, limitent l'ingestion des animaux au pâturage (ceux-ci répugnent à se déplacer) et limitent également la croissance des jeunes bovins à viande en élevage intensif. Les fractures spontanées provoquent des abattages d'urgence et les malades sont mal rentabilisés.

La diarrhée sur les animaux adultes, induite par un excès de molybdène, conduit à la cachexie (1, 84).

L'altération de la laine sur les ovins aboutit à une dépréciation de la toison.

-0-0-0-0-0-

IV - PROPHYLAXIE ET TRAITEMENT

A - TRAITEMENT DE LA CARENCE EN CUIVRE

=====

Une fois franchie l'étape difficile du diagnostic, le praticien doit pouvoir disposer d'un traitement sûr, économique et facile à mettre en oeuvre ; ce traitement doit en outre permettre de faire passer aux animaux un cap délicat et de laisser suffisamment de temps pour mettre en place une prophylaxie nutritionnelle.

1 - Administration d'un sel de cuivre per os

Cette forme de traitement oral ne pose pas de problème particulier hormis les contraintes manuelles qu'elle impose.

a - Le sulfate de cuivre (Cu SO_4 , 5 H_2O)

Il est le plus largement utilisé : les modalités d'administration, les doses et le rythme varient quelque peu suivant les auteurs et les sujets traités (âge, espèce).

- Chez les bovins adultes Havre, Dynna et Ender (84) préconisent une dose de 5 g de sulfate répétée tous les mois. Becker et coll. (14) commencent le traitement des bovins carencés par trois doses, espacées d'une semaine, de 3 g de sulfate de cuivre dilué dans l'eau, et continuent par une distribution de condiment minéral adapté. En France Lamand et coll. (117) administrent quotidiennement 1 g de cuivre, sous forme de 4 g de sulfate inclus par pétrissage dans un bol de suif de 200 g pendant 10 jours et poursuivent le traitement par une supplémentation de la ration de base.

- Chez les ovins adultes Sutherland, Moule et Harvey (179) fixent la dose unique maximum à 1 g de sulfate (250 mg Cu soit 9,3 mg/kg) : une dose de 1,5 g déclenche une diarrhée grave souvent fatale ; d'autre part il existe des risques d'avortement sur les brebis (12).

Karcher (97) donne 300 mg de sulfate de cuivre dilué dans l'eau tous les 10 jours et commence 14 à 15 semaines avant la mise bas. Barlow (12) préconise 1 g de sulfate dilué dans 50 ml d'eau ; il commence le traitement 2 mois avant la fin de la gestation et le répète toutes les 3 à 4 semaines.

Il est possible d'utiliser 400 mg Cu SO₄/jour mélangé à un bol de suif, pendant 10 jours environ (111).

- Pour les jeunes ovins, le sulfate de cuivre est très corrosif et doit être dilué dans une grande quantité de lait. La première dose n'est que de 0,25 g de sulfate ; à partir de la sixième semaine et jusqu'à 6 mois l'agneau peut recevoir 0,5 g de sulfate toutes les 3 à 4 semaines. De toute façon l'efficacité du traitement sur les sujets ataxiques est limitée car les lésions du système nerveux sont irréversibles.

Le traitement oral avec du sulfate de cuivre est peu coûteux mais très astreignant pour l'éleveur ; il peut être utilisé sur des bovins sans risque majeur ; mais sur les ovins (en particulier sur les jeunes) il ne doit être mis en oeuvre qu'avec beaucoup de précautions.

b - L'oxyde de cuivre peut être utilisé également.

La méthode préconisée pour les ovins par Dewey (53) est la suivante : 10 g d'oxyde de cuivre pur sous la forme de fines particules sont administrés per os dans une capsule de gélatine au moyen d'un pistolet spécial. Le cuivre diffuse progressivement, surtout à partir de la caillette, et en une semaine le bilan cuprique de l'animal est rétabli ; l'effet est perceptible encore 1 à 2 mois après.

Cette technique est assez facile à mettre en oeuvre, efficace et moins dangereuse que le traitement au sulfate de cuivre.

Toutefois il semble que la dose de 10 g CuO utilisée par Dewey (53) soit trop importante pour des ovins : les teneurs hépatiques des animaux traités dépassant 1000 ppm Cu/MS dès le seizième jour. Des doses de 5 à 6 g CuO seraient suffisantes.

La méthode est concevable sur les bovins mais aucune expérimentation n'a été réalisée pour préciser les doses à employer. D'ailleurs, en raison des variations d'absorption au niveau intestinal, on peut s'attendre à des différences suivant les régimes alimentaires, les individus. Par conséquent l'efficacité d'un tel traitement ne peut être garantie dans tous les cas.

2 - Les formes injectables

L'injection est une méthode très séduisante. Le nombre des manipulations est réduit au minimum et la dose injectée est connue avec précision. Mais le choix et la mise au point des composés injectables sont délicats (83) ; les produits retenus doivent réunir plusieurs conditions : voie d'injection commode, lésions minima au point d'injection et toxicité réduite, bonne absorption et bonne efficacité, et si possible rémanence de l'effet.

a - Le sulfate de cuivre

En solution aqueuse il a été rapidement écarté. Les injections intraveineuses très lentes (0,75 à 1 g de sulfate pour un bovin adulte) sont possibles mais nécessitent l'intervention d'une personne qualifiée. Quant aux voies sous-cutanée ou intra-musculaire elles provoquent des lésions importantes (4).

b - Le glycinate de cuivre

Il a été initialement retenu parmi de nombreux autres composés (83). Le produit est injecté de préférence par voie sous-cutanée mais il n'est pas toujours très bien toléré et les abcès au point d'injection sont fréquents (49, 88) (Lamand 1969 résultats non publiés). Ces abcès peuvent persister plusieurs mois et ils empêchent la diffusion du cuivre, ce qui explique certains échecs obtenus avec ce type de traitement.

- Chez les bovins la dose maximum fixée par Harvey et coll. (83) se situe à 200 mg de cuivre sur des animaux adultes. Les injections doivent être renouvelées souvent afin de maintenir un bon niveau de cuivre sur les animaux.

Ainsi Cunningham (49) adopte la dose de 400 mg de glycinate (120 mg de cuivre) répétée trois fois dans l'année pour les jeunes de moins d'un an et deux fois pour les adultes.

Alexander et coll. (4) obtiennent des résultats satisfaisants en injectant aux jeunes veaux de 1 mois et demi 200 mg de glycinate et ensuite 400 mg tous les 3 mois. Pour les génisses la dose et le rythme sont identiques. Sur des vaches gestantes il convient d'apporter 400 mg de glycinate tous les 3, 4 mois.

- Chez les ovins il semble préférable de ne pas dépasser 50 mg de cuivre par intervention (83, 179) quelques cas de mortalité pouvant apparaître surtout sur les jeunes. Cunningham (49) utilise 45 mg de cuivre (150 mg glycinate). Le traitement des mères afin de prévenir l'ataxie enzootique des agneaux est réalisé avec une injection de 45 mg de cuivre sous forme de glycinate au milieu de la gestation (88).

c - Cu - Ca - EDTA

Le complexe Cuivre - Calcium - Ethylènediamine tétraacétate a progressivement supplanté le glycinate de cuivre.

Ce composé injecté par voie sous-cutanée est très bien toléré par les animaux : il n'apparaît ni abcès, ni point de nécrose (88) ; la zone d'injection montre seulement dans quelques rares cas un léger oedème sous-cutané accompagné de petites hémorragies (95).

Sur les jeunes bovins une dose de 100 mg de cuivre provoque une augmentation rapide de la cuprémie et un rétablissement progressif des réserves hépatiques (22, 104). Sur les adultes chaque injection apporte de 100 à 200 mg de cuivre sans risque (22).

Chez les ovins le rétablissement du bilan cuprique des mères et la prévention du "sway-back" des agneaux sont obtenus avec une injection sous-cutanée de 50 mg de cuivre (sous forme Cu - Ca EDTA) au milieu de la gestation (88).

Mais ce composé ne semble pas totalement inoffensif : il peut, occasionnellement, provoquer la mort des jeunes agneaux surtout et des brebis, même pour des doses de 25 mg Cu (donc bien inférieures à la dose létale de 3 mg/kg) (95). Les sujets atteints présentent de la dyspnée et évacuent des fécès teintés de sang ; ils meurent rapidement en 1 à 3 jours ; l'autopsie révèle la présence d'hémorragies intestinales, cardiaques et hépatiques ainsi qu'un oedème pulmonaire (95). La cause exacte de ces troubles n'est pas connue : est-ce un phénomène de toxicité aiguë lié à une libération massive de cuivre ?

La thérapeutique des carences en cuivre par le complexe Cu - Ca EDTA est assez largement utilisée dans les pays anglosaxons, en Hollande, en U.R.S.S., aussi bien pour les bovins que les ovins. Elle est efficace dans la très grande majorité des cas. Les injections (30 à 40 mg Cu chez les ovins - 120 à 200 mg Cu chez les bovins) répétées tous les 3 mois permettent de prévenir les carences (XV). Les accidents relevés en pratique ne concernent que les ovins (0,05 à 0,1 p. 100 des moutons traités) et uniquement en Grande Bretagne.

d - Le méthionate de cuivre est proposé en remplacement du complexe Cu - Ca - EDTA sur les ovins. Après injection sous-cutanée en arrière de l'épaule, au poitrail, il apparaît une déformation inflammatoire transitoire, sans gravité.

Le méthionate de cuivre présenté sous forme huileuse s'avère beaucoup moins toxique que le complexe Cu - Ca - EDTA : pour des doses aussi élevées que 13,5 mg Cu/kg aucun trouble n'apparaît sur les moutons ; en suspension aqueuse, injectée par voie sous-cutanée, la DL 50 sur des rats est de 700 mg/kg alors qu'elle est de 25 mg/kg pour Cu - Ca - EDTA (94).

La dose recommandée pour la prévention de l'ataxie enzootique des agneaux est de 45 mg Cu par brebis (94).

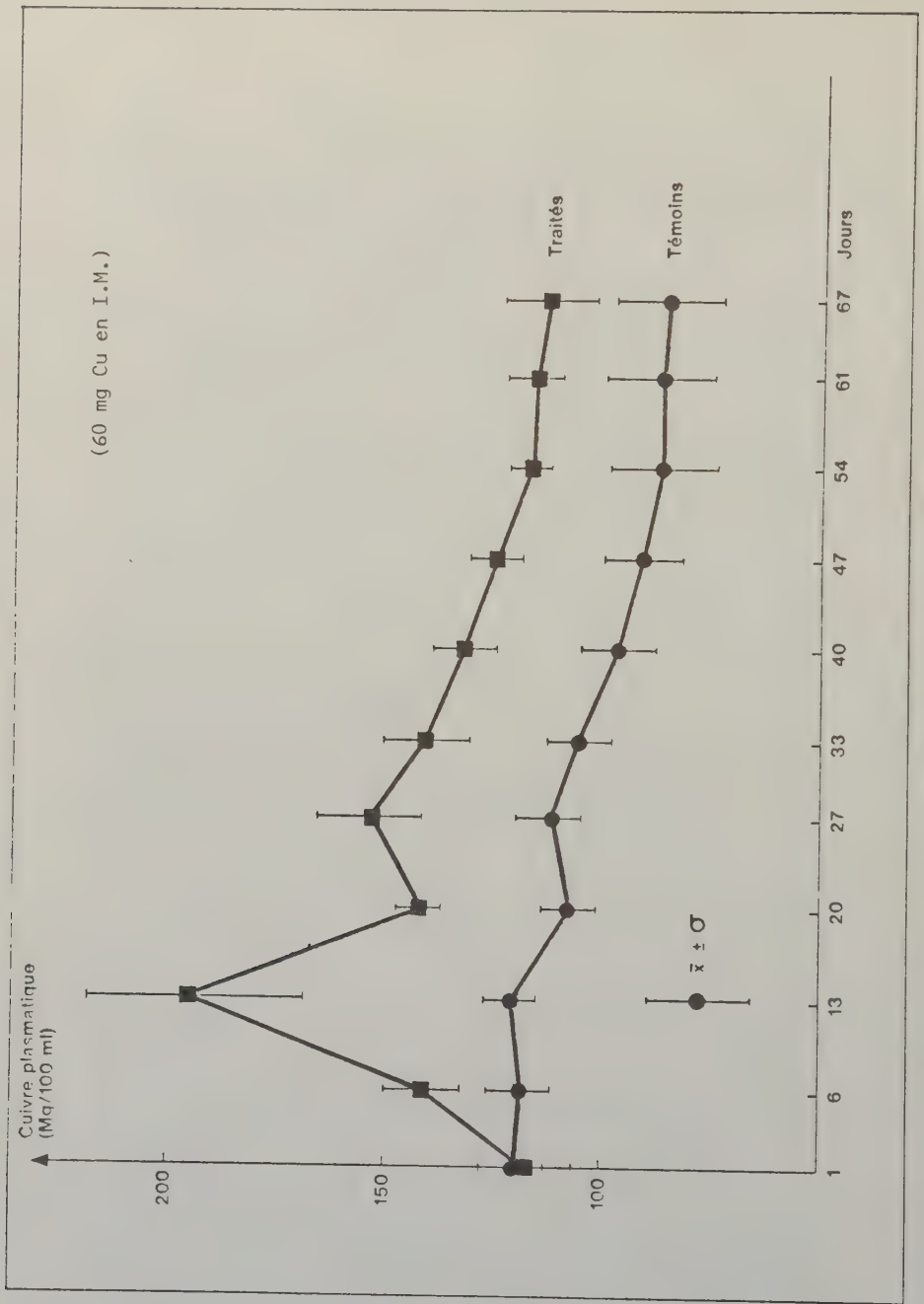


Figure 12 : Evolution de la cuprémie après injection de Cuivre oxyde

Les résultats obtenus sont très satisfaisants bien que les bilans hépatiques soient supérieurs sur les agneaux avec le cuivre EDTA (88).

Les essais menés à grande échelle dans les conditions naturelles ont confirmé l'efficacité et l'inocuité du cuivre méthionate chez les moutons en Grande Bretagne (94).

Ce complexe est utilisable pour des bovins en intra-musculaire profonde.

e - L'oxyde de cuivre

En France, le groupe de recherche de l'INRA sur les oligoéléments, fort des résultats étrangers, a orienté ses travaux vers deux formes de cuivre injectable : le cuivre pulvérulent et l'oxyde de cuivre (CuO).

- Le cuivre pulvérulent en suspension dans l'huile d'olive purifiée est efficace sur les ovins et très bien toléré en intra-musculaire : il permet une libération lente à partir du point d'injection et une mise hors carence de l'animal pendant au moins trois semaines (116). Mais chez les bovins la réaction inflammatoire suivant l'injection est plus marquée, ce qui diminue la période d'efficacité du produit. (Lamand résultats non publiés).

- l'oxyde de cuivre (CuO) en suspension dans l'huile d'olive purifiée administré par voie intramusculaire ne provoque ni douleur, ni grande inflammation pas plus sur les ovins que sur les bovins ; toutefois, un point de fibrose pouvant persister dans quelques cas, il est préférable d'injecter le liquide au niveau de l'encolure de façon à ne pas léser un muscle noble.

Sur les ovins adultes la dose de 60 mg Cu sous forme d'oxyde s'accompagne d'une augmentation de la cuprémie dès le sixième jour, au treizième jour elle est maximum ; par rapport aux animaux témoins le cuivre plasmatique est significativement supérieur chez les animaux traités depuis le treizième jour jusqu'au cinquante quatrième jour (figure 12). Au soixante

septième jour le cuivre hépatique est supérieur au seuil $P < 0,025$ chez les animaux traités (190 mg/kg MS contre 55 mg/kg MS) (115).

Sur les bovins les résultats obtenus sont analogues (Lamand non publié).

Sous cette présentation originale les injections de cuivre permettent donc une bonne correction des carences.

Le processus inflammatoire très modéré survenant après l'administration intra-musculaire conduit à une libération progressive du cuivre de l'oxyde ; celui-ci est totalement métabolisé par l'animal : il permet une augmentation rapide et durable de la cuprémie et de la céruloplasmine, tandis que l'excès est stocké au niveau du foie. Dans ces conditions l'animal recouvre un bilan cuprique favorable en une semaine environ et le conserve pendant un délai, variable suivant le niveau de cuivre dans la ration, de 1 à 4 mois (115).

Ce médicament mis au point par l'INRA - CRZV (centre de Theix) est protégé par un brevet ANVAR. Il est commercialisé par les laboratoires PROLIGO sous le nom de PROLONTEx/cuivre et constitue actuellement la seule spécialité française injectable disponible sur le marché.

Chaque flacon contient 125 mg de cuivre sous forme d'oxyde CuO mis en suspension dans 10 ml d'huile d'olive purifiée ; le volume utile de 20 ml des flacons sert à favoriser l'homogénéisation du principe actif en agitant avant emploi.

- Chez les vaches laitières et les bovins adultes la dose à injecter est de 125 mg (1 flacon de 10 ml) ; cette dose permet d'apporter 6 mg de cuivre par jour si l'on se place dans le cas extrême d'un apport journalier très insuffisant (presque nul) en tenant compte d'un coefficient de digestibilité de 10 p 100 du cuivre de la ration (voir tableau L) ; elle permet donc, dans une hypothèse pessimiste de placer un animal hors carence pendant un minimum absolu de 1 mois.

En pratique cet effet retard se situe entre 2 et 4 mois selon l'intensité de la carence rencontrée.

Chez les veaux de 100 kg et plus, la dose recommandée est de 62,5 mg de cuivre, soit 5 ml de PROLONTEX/cuivre.

- Chez les ovins adultes et les jeunes veaux la posologie est de 3 à 4 ml de PROLONTEX (37,5 à 50 mg de cuivre). Il est important sur les ovins adultes de ne pas dépasser 50 mg de cuivre car un surdosage risquerait de provoquer des cas de mortalité par ictère hémolytique. Avec une dose de 60 mg de cuivre M. Lamand (115) obtient un cuivre hépatique de 1060 µg/g MS sur un animal, ce qui est déjà un peu supérieur à la limite de toxicité habituellement admise (XV). Une dose normale permet de placer les moutons hors carence pendant un minimum de 2 mois.

- Chez les jeunes ovins la dose de 1 ml/10 kg de poids vif constitue une limite qu'il est prudent de ne pas franchir.

Il est déconseillé d'abattre les animaux juste après l'injection. Au dixième jour la zone inflammatoire est de la taille du poing et nécessite un "parage" de 1,5 kg de viande ; au vingtième jour le parage touche 1 kg environ et au trentième jour on n'a plus qu'un oeuf de poule ; ensuite il ne reste qu'un petit point de fibrose. Le cuivre étant injecté sous forme insoluble il n'imprègne pas la viande, hormis la zone d'injection, ce qui rend négligeables les risques pour le consommateur (111).

Le PROLONTEX/Cuivre est donc un médicament sûr à conditions de respecter la posologie ; il apporte au vétérinaire la certitude d'une correction de la carence. Habituellement les premiers signes de récupération s'observent vers 15 jours 3 semaines. Il est inutile de répéter l'injection, même en cas d'échec apparent ; il convient alors de revoir le diagnostic.

Cette spécialité est utilisable pour le traitement des carences aiguës, ainsi que pour la prévention des éventuelles subcarences dans les cas où les autres modes de prophylaxie ne sont pas applicables.

B - PROPHYLAXIE DE LA CARENCE EN CUIVRE

=====

La meilleure prévention des carences en oligoéléments consiste en la couverture théorique des besoins animaux ; pour le cuivre la prophylaxie de la carence doit être systématique sur tous les ruminants.

Elle peut être réalisée suivant deux grandes modalités : soit directement au niveau animal par une complémentation adaptée, soit au niveau sol-plante par l'enrichissement des fourrages sur pied.

Lorsqu'il s'agit d'animaux nourris individuellement tels que vaches laitières, jeunes en stabulation entravée, il est facile de réaliser une complémentation minérale directe par apport d'oligoéléments dans les rations individuelles.

Mais si le rationnement est collectif cette méthode ne va pas sans poser de problèmes. Il s'agit le plus souvent d'animaux sur pâturage, sur parcours, ou nourris en libre-service et ne disposant que de fourrages carencés. Dans ces situations il est impossible de contrôler les quantités d'oligoéléments absorbées. La distribution de cuivre en même temps que les aliments devient nécessaire ; mais un apport global risque d'être soit inefficace, soit toxique, en fonction des quantités ingérées individuellement.

1 - Intervention au niveau de l'animal

L'addition de cuivre directement dans l'aliment s'effectue le plus souvent par le sulfate de cuivre hydraté ($\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$). Sa distribution à l'animal peut être assurée par un condiment minéral ou par la pierre à lécher.

L'apport du sel dans l'eau de boisson est ordinairement impraticable car la solution corrode les tuyaux et les récipients ; le maintien d'une concentration adéquate dans de grandes quantités d'eau est impossible ; de plus l'eau ne doit pas contenir de composés précipitant le cuivre. Quant à l'administration quotidienne de "gateaux de cuivre" elle est beaucoup trop fastidieuse pour être mise en oeuvre couramment.

a - Complémentation du régime par un condiment minéral approprié

C'est la méthode de choix lorsque les animaux bénéficient d'un rationnement individuel. Le cuivre et les autres oligoéléments seront apportés en même temps que les éléments majeurs, par un complément minéral équilibré distribué à l'auge.

Dans l'ensemble les condiments minéraux proposés ont des teneurs de 1 à 2 p.100 en sulfate de cuivre pour les bovins (14,117) et de 0,25 à 0,6 p.100 pour les ovins (12). Ils assurent une fourniture suffisante en cuivre, pourvu que les animaux disposent d'une quantité adaptée du composé.

Chez les bovins en alimentation traditionnelle, l'ajustement entre les apports et les besoins est réalisé pour la ration de base (foins, ensilages, racines ...) : les aliments concentrés étant complémentés par le fabricant et distribués par intermittence en fonction des productions, il est préférable de ne pas en tenir compte. Mais dans le cas des rations condensées l'ajustement doit être effectué pour la totalité de la ration (117).

Le calcul du condiment minéral est assez simple. Par exemple pour une vache laitière ingérant 12 kg de MS par jour d'un fourrage contenant 5 mg de cuivre/kg MS (teneur fréquemment rencontrée dans les foins de prairies naturelles première coupe (20)) et ayant des besoins de 10 mg/kg MS, le déficit journalier à couvrir est de 60 mg de cuivre soit 240 mg de sulfate de cuivre.

Le même raisonnement appliqué aux autres oligoéléments permet de définir la composition d'un complément minéral distribué à raison de 100 g par animal et par jour (Tableau LV).

Si la ration de base est constituée d'ensilage de maïs enrichi en urée et en soufre, de foin peu digestible, ou d'ensilage contaminé par de la terre, les apports de cuivre seront ajustés à 14 - 15 mg/kg MS.

TABLEAU LV : Exemple de calcul d'un complément minéral distribué à des bovins à raison de 100 g/jour.

Elément	Déficit journalier à couvrir (1)	Forme de sel	proportion d'élément dans le sel	Facteur de multiplication	Quantité journalière de sel à apporter dans 100 g C.M	Composition du condiment minéral
Cu	60 mg	Cu SO ₄ , 5H ₂ O	1/4	4	240 mg	2,4 g/kg
Co	1,2 mg	Co SO ₄ , 7H ₂ O	1/5	5	6 mg	60 mg/kg
I	7,2 mg(2)	Ca (IO ₃) ₂	2/3	3/2	10 mg	100 mg/kg
Mn	360 mg	Mn SO ₄ , H ₂ O	1/3	3	1 g	10 g/kg
Zn	300 mg	Zn SO ₄ , 7H ₂ O	1/4	4	1,2 g	12 g/kg
Se	0,6 mg	Se O ₃ Na ₂	1/2	2	1,2 mg	12 mg/kg

(1) Déficit à couvrir pour la ration de base : vache laitière ingérant 12 kg/MS d'un foin de prairie naturelle lère coupe.

(2) Pour une laitière haute productivité.

Rappelons aussi que, dans le cas d'un fourrage riche en molybdène (plus de 3 mg Mo/kg MS) il convient d'augmenter les apports en cuivre : si on a 7 ppm de molybdène il faudra augmenter les besoins de 10 ppm à 15 - 20 ppm en cuivre (112). Heureusement ce problème est limité en France à quelques sols argilo-calcaires (Lias et Jurassique), à certaines zones de pollution industrielle (aciéries) et à l'emploi d'engrais molybdiques pour améliorer les rendements des luzernières.

Nous savons que le cuivre doit faire partie de la ration au même titre que les autres éléments. Mais il ne peut être que néfaste d'apporter un condiment trop enrichi, sous prétexte de couvrir largement les besoins des animaux : des troubles graves et même une mortalité anormale peuvent en résulter.

Par ailleurs, il importe d'assurer une prophylaxie soutenue ; le condiment minéral doit être distribué toute l'année, y compris à l'herbage ou en période de tarissement pour les vaches laitières. Il n'y a aucun intérêt à donner des à-coups dans la prophylaxie des carences : "les condiments de cure" disponibles sur le marché et recommandés par le fabricant avant certaines périodes critiques, réalisent un apport intermittent et sont à éviter.

b - Les pierres à lécher

Il est souvent difficile de supplémer en oligoéléments les animaux élevés en lot ou au pâturage. La solution des blocs à lécher peut être intéressante dans la mesure où les consommations probables sont connues et la formule du bloc à lécher adaptée à cette consommation.

La dispersion des concentrations en sulfate de cuivre des pierres à lécher proposées par différents auteurs illustre bien la difficulté du problème : de 0,5 à 5 p.100 (12, 82, 84, 119).

Sur des vaches laitières les consommations moyennes (de sel pur) relevées sont essentiellement fonction du poids

de l'animal : 38,8 g par jour pour les FFPN de 600 kg et 28 g pour les Jersiaises de 380 kg (119). Ces résultats sont en accord avec les moyennes Hollandaises : 32 g par jour pour des vaches laitières et 17 g pour des veaux broutards (82). Contrairement à ce que pensent souvent les éleveurs, les consommations ne sont pas étroitement liées à un besoin instinctif en sel des animaux ; autrement dit l'animal ne règle pas la quantité absorbée en fonction de ses besoins.

Pour une même catégorie d'animaux, les niveaux d'ingestion quotidiens varient considérablement d'un individu à l'autre (82, 119) : de 9 g à 162 g pour des laitières FFPN (119). C'est ce facteur de variation qui conditionne avant tout l'efficacité et l'inocuité de la méthode : il est nécessaire de compléter au mieux les animaux ayant l'ingestion la plus faible, tout en évitant d'intoxiquer les animaux ayant les consommations les plus élevées.

Il est important d'adapter les concentrations en cuivre du bloc à lécher. Par exemple, pour des bovins ingérant 12 kg de MS / jour d'un fourrage à 5 mg Cu/kg MS, le déficit journalier à couvrir est de 60 mg de cuivre pour des besoins de 10 mg Cu/kg MS. Si la consommation moyenne de sel est de 40 g par jour les pierres à lécher devront contenir 1,5 g de cuivre par kilo (soit 0,6 p.100 de sulfate) (119). Avec une telle composition, les animaux ingérant un minimum de 10 g de bloc enrichi verront leurs apports augmentés de 1,25 mg Cu/kg de MS ce qui est faible mais non négligeable ; à l'opposé un animal ingérant 160 g reçoit l'équivalent d'un enrichissement de la ration de 20 mg Cu/kg MS ce qui est bien au-dessous des normes de toxicité proposées pour les bovins. Les autres oligoéléments peuvent être apportés de même façon.

En conclusion, la supplémentation en cuivre (et autres oligoéléments) des animaux par des blocs à lécher en libre service est utilisable lorsque la complémentation individuelle n'est pas possible. Toutefois il est important d'évaluer la consommation des animaux et d'adapter la composition des

pierres à cette consommation : il ne peut y avoir de blocs à lécher "passe partout". Cette méthode est peu coûteuse, facile d'emploi, mais imparfaite car certains animaux échappent partiellement à cette prophylaxie ; il est intéressant aussi de faciliter l'accès des pierres à lécher pour les animaux au pâturage en vue d'augmenter l'apport des minéraux.

2 - Intervention au niveau sol-plante

Nous avons vu, dans le chapitre II, que de très nombreux facteurs étaient susceptibles de faire varier le taux de cuivre dans la plante : le choix des espèces et le système d'exploitation peuvent donc contribuer substantiellement à améliorer le niveau de l'apport alimentaire à l'animal. Mais l'enrichissement d'un fourrage donné, dans des conditions définies, ne peut être obtenu, que par un apport de cuivre : celui-ci peut être réalisé soit au niveau du sol, avant semis ou en couverture sur la prairie en phase de repos hivernal, soit par pulvérisation foliaire sur le végétal en cours de croissance active. De telles techniques sont utilisées pour améliorer les rendements des céréales, et plus rarement des fourrages sur certains sols particulièrement pauvres en cuivre (38).

Dans le cas présent, ces méthodes visent à enrichir les fourrages sur pied de façon à obtenir une teneur en cuivre d'environ 10 mg/kg MS, ce qui permet de couvrir les besoins du ruminant. Cette solution est intéressante puisqu'elle peut être appliquée à tous les animaux qu'ils soient au pâturage, en libre-service ou en stabulation entravée.

a - Enrichissement par apport de cuivre au sol

L'apport de sulfate de cuivre (Cu SO_4 , 5 H_2O) au sol est une technique courante dans les pays où on a décelé des carences en cuivre sur les animaux au pâturage : elle est employée systématiquement en Nouvelle Zélande, en Australie (XV), elle donnerait de bons résultats en Suède, en Irlande,

en Hollande et en Allemagne du Nord, mais des résultats moins nets en Ecosse où les sols organiques réagissent mieux que les sols minéraux (163).

Les doses préconisées varient suivant les sols et les auteurs entre 5 et 50 kg de sulfate de cuivre/ha (le plus souvent autour de 20 kg/ha) épandus en une fois tous les ans pendant plusieurs années. La répartition homogène d'une si faible quantité sur toute la surface suppose le mélange préalable des cristaux finement broyés avec du sable ou un autre engrais, ou la dissolution du sel dans de grandes quantités d'eau (40, 154).

Le cuivre ainsi apporté est très énergiquement retenu par les colloïdes du sol qui le libèrent très lentement pour la plante. Même en milieu acide, où il peut s'accumuler sous une forme rapidement diffusible au point d'atteindre des teneurs toxiques pour les végétaux (52), le franchissement de la barrière racinaire et la diffusion vers les parties aériennes, variables avec l'espèce, peuvent être insignifiants (61).

Les réseaux expérimentaux, mis en place par l'INRA de 1969 à 1974, ont cherché à préciser quelques unes des conditions d'emploi du sulfate de cuivre, sous différents contextes pédo-climatiques, pour plusieurs plantes exploitées à des stades variés.

a.1 - Influence du mode d'apport

Lorsque le cuivre est apporté au sol avant semis et mélangé à la terre par les façons culturales (enfouissement par le labour ou incorporation par les façons superficielles qui précèdent le semis) le résultat est extrêmement faible voire nul. Par contre l'efficacité de l'apport sur la prairie en place, en fin d'hiver juste au moment du démarrage de la végétation est beaucoup plus nette (40, 43, 154).

a.2 - Spécificité génétique de la plante et stade d'exploitation

- Dans le cas des prairies complexes la séparation des espèces (Tableau LVI) montre que les graminées restent les plantes les plus pauvres en cuivre et les plus rebelles à l'enrichissement qui ne peut dépasser 30 à 40 p. 100 à des stades tardifs. Par contre les légumineuses et, mieux encore des plantes diverses voient leurs teneurs plus facilement augmentées (148, 154).

- Avec un apport de 25 kg de sulfate de cuivre dissous dans 1000 litres d'eau par hectare, le comportement des plantes se différencie nettement aux premiers stades (Tableau LVII). Les variétés précoces sont extrêmement riches en cuivre au moment de la différenciation visible des épis en bas des tiges (stade déprimage) (plus de 100 ppm pour le dactyle floréal) ; les variétés plus tardives, fétuque des prés, et surtout ray grass anglais Melle pâture et luzerne sont peu enrichies à ce stade. Cependant, à égalité de précocité, le dactyle s'enrichit plus que le brome et surtout que la fétuque des prés : chaque plante garde donc un comportement spécifique.

Cet enrichissement diminue ensuite rapidement au cours du temps : au stade pâture (épi à 10 cm) les taux de cuivre restent encore élevés chez les plantes initialement très riches ; au stade ensilage les écarts s'atténuent et l'enrichissement n'est plus que de 10 à 40 p. 100 supérieurs aux témoins (43, 154).

Le tableau LVII montre aussi que le cuivre apporté avant un premier cycle agit encore non seulement sur les autres cycles, mais aussi les années suivantes : cet arrière-effet reste cependant modéré (teneurs multipliées par 1,1 à 1,5 quel que soit le stade, suivant les plantes et les années).

Les mêmes lois générales se retrouvent dans le cas des prairies naturelles (142, 164).

TABLEAU LVI : Essai d'enrichissement en cuivre d'une prairie complexe (INRA Theix)
(S. Périgaud 1970)

Date	Stade	Plantes	Témoïn	Cuivre au sol 6 kg Cu/ha avant départ végétation (10.04.69)	200 g Cu/ha par coupe (Oxychlorure)	Cuivre feuilles Nb de jours écoulés depuis le dernier apport de Cu
3.6.69	Ensilage	Graminées Légumineuses Divers Mélange	4,8 ** 6,7 ** 9,1 5,5 **	6,5 ** 10,1 ** 12,8 7,8	9,9 ** 21,7 ** 24,7 11,9	20
17.6.79	Foin (1° coupe)	Mélange	5,4 **	6,2	7,9	35
4.8.69 (+ 7 sem.)	Foin (2° coupe)	Mélange	7,8	8,2	14,8	23
24.9.69 (+ 7 sem.)	Foin (3° coupe)	Mélange	9,0 *	10,6	15,8	18

* différence significative (P < 5 %)

** différence hautement significative (P < 1 %)) entre les résultats encadrant le signe

TABLEAU LVII : Effet d'un apport de Cuivre au sol sur la teneur en cuivre de fourrages - 1er cycle 1974

(Cu en mg/kg MS) Essai CRZV Theix

	Stade Déprimage				Stade Pâture				Stade ensilage			
	Date	Témoïn	Traité en 1973	Traité en 1974	Date	Témoïn	Traité en 1973	Traité en 1974	Date	Témoïn	Traité en 1973	Traité en 1974
Dactyle (Floréal)	5.4	11,2	14,6**	106,0**	10.5	6,7	9,0**	11,4**	21.5	5,9	7,4**	7,4
Brome (Lubrome)	8.4	11,3	13,8**	67,1**	13.5	8,5	9,9*	13,9**	28.5	7,4	9,2*	10,3*
Fétuque élevée (Clarisse)	8.4	9,4	10,5*	32,5**	13.5	6,6	8,1*	12,3**	28.5	6,1	7,3*	8,4*
Fétuque des prés (Séquana)	2.5	5,6	8,4*	10,4**	21.5	5,2	6,8	6,8	5.6	4,9	6,1	5,4
Luzerne (du Puits)	7.5	8,3	9,4*	16,3**	18.6	8,5	8,7	10,1*	18.6	6,6	7,0	7,2
Ray Grass Anglais	24.4	8,3	11,3**	15,9**	21.6	5,7	7,3*	8,0**				

* Différence significative à $P < 0,05$ ** Différence hautement significative à $P < 0,01$) par rapport au témoin

TABLEAU LVIII - Enrichissement en Cuivre des fourrages sur pied

Richet, Périgaud, Lamand 1975

		TRAITEMENTS					Observations (Opérations effectuées)	
	Cycle	Date	Témoïn	Apport au sol (a)	Pulvérisation foliaire faible dose (b)	Pulvérisation foliaire dose forte (c)		
PRAIRIE NATURELLE 1974 S.E.I. Mirecourt	1	12.4	7,2	—	18,3	34,2	Apport au sol et pulvérisations foliaires	
		16.4	6,9	59,3	19,4	40	Pâtûre simulée	
		24.4	5,3	83,2	—	22,1	Conserve	
	2	27.5	5,7	10,6	15,6	—	Pulvérisations foliaires	
		5.6	5,4	9,4	7,4	—	Pâtûre	
	3	26.7	5,5	—	17,4	43,3	Pulvérisations foliaires	
		31.7	5,4	7	15,9	—	Pâtûre	
		30.8	4,6	5,6	—	9,8	Conserve	
	PRAIRIE PERMANENTE Chateau Salins	1	4.4	—	—	—	—	Apport au sol
9.5			6,2	—	—	31,5	Pulvérisations	
14.5			5,1	104,1	11,5	24,5	Pâtûre	
20.6			3,1	14	—	6,6		
2		22.7	—	—	11,8	—	Pulvérisations foliaires	
		26.7	6,6	24,4	7,6	—	Pâtûre	
LUZERNE - DACTYLE 1974 Chateau Salins		1	4.4	—	—	—	—	Apport au sol
			9.5	6,8	—	14,5	18,7	Pulvérisations
			14.5	7,6	110,9	10,5	16,3	Pâtûre
	5.6		6,6	21,6	—	10,1		
	2	9.7	8,3	—	11,1	17,6	Pulvérisations	
		12.7	7,5	8,8	12,6	20,4	Pâtûre	
		27.7	6,2	7,7	—	7,9	Foin	
	3	5.9	7,1	—	10,4	19,4	Pulvérisations	
		11.9	7,4	8	9	8,9	Pâtûre	
16.9		7,1	7,8	—	10	Foin		

a) Apport au sol : 25 kg sulfate de cuivre/ha dissoud dans l'eau et neutralisé à la chaux

b) 200 g de sulfate de cuivre/ha dissoud dans l'eau et neutralisé à la chaux

c) 600 g de sulfate de cuivre/ha dissoud dans l'eau et neutralisé à la chaux

L'apport en fin d'hiver (Mars - Avril) de 24 ou 25 kg de sulfate de cuivre par hectare provoque un enrichissement important, parfois trop important de la première pâture printanière (Tableaux LVIII et LIX) : il faut éviter de donner ce fourrage à des ovins.

Puis les excès des teneurs diminuent rapidement au point de devenir insuffisants au stade foin lorsque la pousse de l'herbe est normale. L'enrichissement obtenu peut permettre de franchir un seuil de carence, mais il ne peut assurer une couverture toujours satisfaisante des besoins.

Aux autres cycles les taux de cuivre relevés sont plus modérés : ils peuvent convenir à des exploitations de type pâture pour des ovins, mais ils sont trop faibles au stade conserve.

a.3 - Conclusions pratiques

L'apport de cuivre au sol est une méthode facile à mettre en oeuvre, ne nécessitant qu'une seule intervention par an. Les doses à employer sont élevées (6 à 10 kg de cuivre/ha), sans commune mesure avec les quantités exportées par la récolte (quelques dizaines de grammes de cuivre/ha). L'épandage est réalisé sur prairie déjà implantée, en fin d'hiver.

Mais il faut retenir que les tous premiers stades du premier cycle (déprimage et pâture) risquent d'être trop largement enrichis pour des espèces précoces, ce qui exclut une consommation par les ovins ; en revanche avec des espèces tardives le danger est quasi nul.

Dans le cas des prairies naturelles dont on connaît mal la composition botanique, il est prudent de soustraire les moutons du premier cycle de l'année d'intervention. Par contre les bovins, plus résistants, peuvent largement bénéficier de l'enrichissement particulièrement favorable à un stade précoce où le cuivre de l'herbe jeune est peu assimilable.

Au stade fauche ultérieur et pour les cycles suivants, les teneurs en cuivre sont le plus souvent insuffisamment améliorées.

TABLEAU LIX : Enrichissement des fourrages de prairie permanente par l'apport
de Cuivre au sol (Cu SO₄ 24 kg/ha)
Essai INRA Theix F. de Montard et S. Périgaud 1975

Lieu	Année	Date d'apport	Date de la 1 ^{re} récolte	Cuivre mg/kg MS		Enrichissement
				Témoïn	Traité	
Laqueuille	1972	28.4	19.5 7.7	7,1 3,1	153,6 5,3	146,8 2,2
Laqueuille	1973	18.4	14.5 21.5 31.5 12.7	7,5 6,3 5,0 4,3	75,3 28,1 10,5 4,8	67,8 21,8 5,5 0,5
Orcival 1	1973	18.4	14.5	7,4	30,5	23,1
Orcival 2	1974	26.3	8.5	6,7	37,8	31,1
CRZV Cases	1974	26.3	26.4	8,4	49,0	40,6
CRZV Redon	1974	26.3	25.4	6,9	23,5	16,6
Moyenne				6,27	41,84	35,57

Cette technique ne permet donc pas un enrichissement régulier et correct du fourrage, et n'est applicable que dans certains cas.

b - Enrichissement par pulvérisations foliaires

Les pulvérisations foliaires de sels de cuivre sur la végétation en pleine croissance évitent les compétitions sol-plante et contournent la barrière racinaire, ce qui autorise des quantités de cuivre bien moindres que celles requises en apport au sol (38, 146).

De telles pratiques sont utilisées aux USA, en Nouvelle Zélande, en Grande Bretagne, mais les résultats sont peu précis.

Les recherches menées par l'INRA en France ont cerné l'influence des facteurs tels que espèces, date, forme et dose de l'apport, conditions météorologiques, de façon à dégager des règles pratiques en fonction des buts poursuivis.

b.1 - Flore - Moment de l'intervention

L'enrichissement obtenu avec 200 g Cu/ha sous forme d'oxychlorure en solution à 0,4 g/litre est supérieur au "cuivre - sol" (Tableau LVI) (146, 148). Le tri des espèces au stade ensilage confirme le classement habituel : graminées < légumineuses < plantes diverses (surtout pissenlits) ; il montre aussi que les légumineuses (x 3,2) et les plantes diverses (x 2,7) s'enrichissent beaucoup plus facilement que les graminées (x 2) (Tableau LVI).

La forme et l'importance relative du feuillage de chaque espèce au moment de la pulvérisation, son développement ultérieur jusqu'à la récolte sont autant de facteurs qui jouent sur l'efficacité finale de l'intervention.

Ainsi, pour un ray grass de première année récolté au stade pâture, les indices moyens d'enrichissement pour les trois cycles obtenus avec une solution de sulfate de cuivre

à 0,5 p.100 apportant 135 g Cu/ha sont d'autant plus élevées que la pulvérisation est tardive : ils sont de 1,01 à 1,07 lorsqu'elle est réalisée le jour de la coupe, de 1,18 à 1,49 lorsqu'elle intervient une semaine après la coupe (repousses de 7 cm), et de 1,63 à 2,17 après 2 semaines (repousses de 15 cm) (43).

Il convient donc d'intervenir au plus tôt lorsque le système foliaire est bien développé, bien couvrant, et au plus tard, en début de montaison pour ne pas trop abîmer les plantes (149).

b.2 - Dose de cuivre apporté

Les quantités de cuivre à apporter sont variables suivant le but recherché. Elles sont à adapter d'une part au rendement escompté à la récolte, plus élevées pour une fauche à foin que pour une pâture (149) ; d'autre part à la fraction de cuivre effectivement retenue par le feuillage, celle-ci étant fonction du cycle et du stade, et des conditions atmosphériques. (154).

En effet, même en conditions de travail correctes, les pertes au sol lors de la pulvérisation s'élèvent à (43) :

- 60, 70 p.100 sur les premiers cycles traités précocement (sol mal couvert, port dressé du feuillage souvent mouillé),

- 40, 60 p.100 sur les premiers cycles traités tardivement,

- 25, 30 p.100 sur les autres cycles (très bon couvert et port horizontal).

Il n'y a donc aucun rapport systématique entre la quantité effectivement reçue par le feuillage et le tonnage d'herbe sur le terrain (154) : le même apport enrichit momentanément plus une prairie au stade montaison que la même au stade herbacé (figure 14), ceci malgré des quantités d'herbe 3 à 4 fois plus fortes dans le premier cas.

Aussitôt après l'épandage une forte dose enrichit plus le fourrage, mais la décroissance ultérieure est plus rapide qu'avec une dose faible (figure 16, courbe de gauche). Tout se passe comme si la plante tendait, compte tenu de sa croissance, à stabiliser son taux de cuivre à des niveaux compatibles avec son métabolisme : l'enrichissement final dépend donc de la dose et de l'intervalle de temps compris entre pulvérisation et récolte (154).

Dans de telles conditions, la gamme des quantités utilisées s'étale de 20, 30 à 200 g de cuivre/ha.

b.3 - Forme de l'apport en cuivre

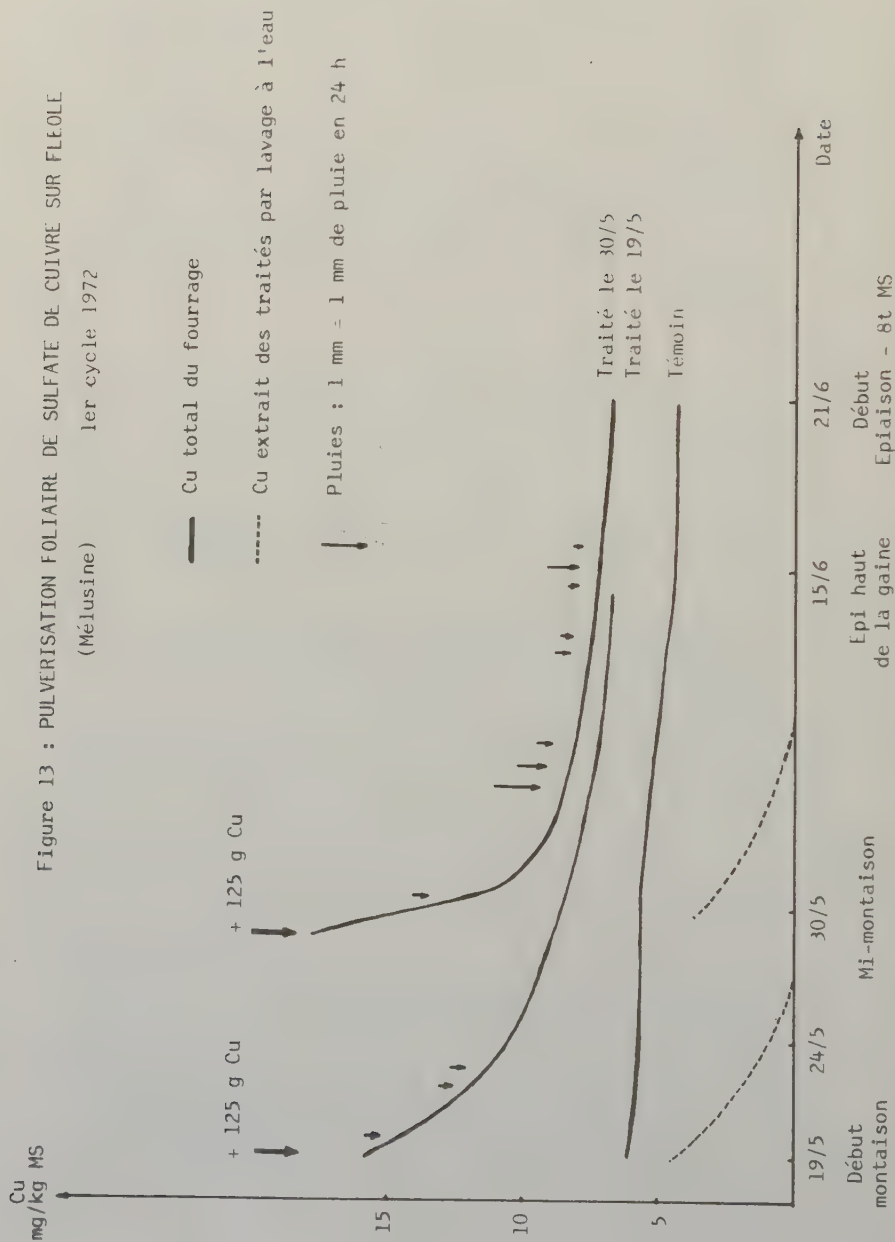
Plusieurs formes chimiques de cuivre sont utilisables en pulvérisations foliaires :

b.3.1 - Le sulfate de cuivre en solution aqueuse tend à provoquer des brûlures lorsqu'il est employé pur à une concentration supérieure à 1 p.1000 (et même 0,5 p.1000 seulement sous fort ensoleillement et chaleur sèche) (38, 43), ce qui limite la quantité totale de cuivre susceptible d'être apportée à 125 g/ha dans les meilleurs cas.

Les niveaux d'enrichissement obtenu avec ce sel de cuivre sont satisfaisants aux stades précoces (teneurs multipliées par 2 à 2,2 au stade pâture) mais diminuent rapidement ensuite (teneurs x 1,2 à 1,7 au stade ensilage) (43).

Les courbes d'évolution des teneurs dans les jours qui suivent la pulvérisation sont du même type, quelle que soit la graminée considérée et son cycle (figures 13, 14, 15, 16 - courbe de gauche) ; elles comprennent deux phases distinctes :

- au cours de la première phase, de 3 à 8 jours, la diminution du taux de cuivre est très rapide. Elle est un peu plus lente, en premier cycle, quand la pulvérisation est faite au stade herbacé que lorsqu'elle intervient en début de montaison (figures 13 et 14) ; aux autres cycles les résultats sont variables d'une année à l'autre suivant la pousse du végétal (151).



Autrement dit l'enrichissement obtenu, par rapport au témoin, s'atténue d'autant plus vite que la croissance est plus active (43, 154) : il convient donc d'être prudent sur des cycles d'été sec et de diminuer les doses de cuivre.

- dans la seconde phase, à partir du cinquième au huitième jour après la pulvérisation le taux de cuivre baisse plus lentement et tend à se stabiliser, en 3 semaines environ, à un niveau faiblement supérieur à celui du témoin non traité (figures 13, 14) (154).

Le cuivre apporté sous cette forme soluble pénètre rapidement dans la plante : dès les premières heures le sulfate déposé sur les feuilles est retenu dans l'épiderme, puis pénètre plus lentement ensuite car sa migration vers le reste du végétal est difficile et faible (89) ; en 3 à 5 jours il disparaît totalement de la surface des feuilles (figures 13, 14) (154).

Avant ce laps de temps, le cuivre, qui est retenu encore superficiellement par des mécanismes de type sorption, peut être perdu sous l'influence d'un lessivage intense par les pluies (154) : c'est ainsi qu'un orage violent de courte durée (12 mm en 30 mn) 24 heures après la pulvérisation, élimine totalement les produits solubles encore présents, et même la plus grande partie de ce qui a déjà pénétré (figure 15) ; une pluviométrie importante, mais momentanément moins intense (20 mm étalés sur 24 heures) n'élimine pas tout le cuivre soluble (figure 16) ; des pluies fines inférieures à 1, 2 mm sont sans conséquences (figures 13, 14), les pertes étant vraisemblablement compensées par une meilleure absorption du sel maintenu à l'état soluble (89).

En conséquence, le sulfate pur, d'emploi commode et peu onéreux, n'arrive pas, dans les meilleures conditions, à enrichir suffisamment les fourrages lorsque l'intervalle de temps entre la pulvérisation et l'exploitation dépasse 6, 7 jours. Il est donc à réserver exclusivement aux objectifs pâture et si les conditions météorologiques sont prévues au beau stable pour quelques jours.

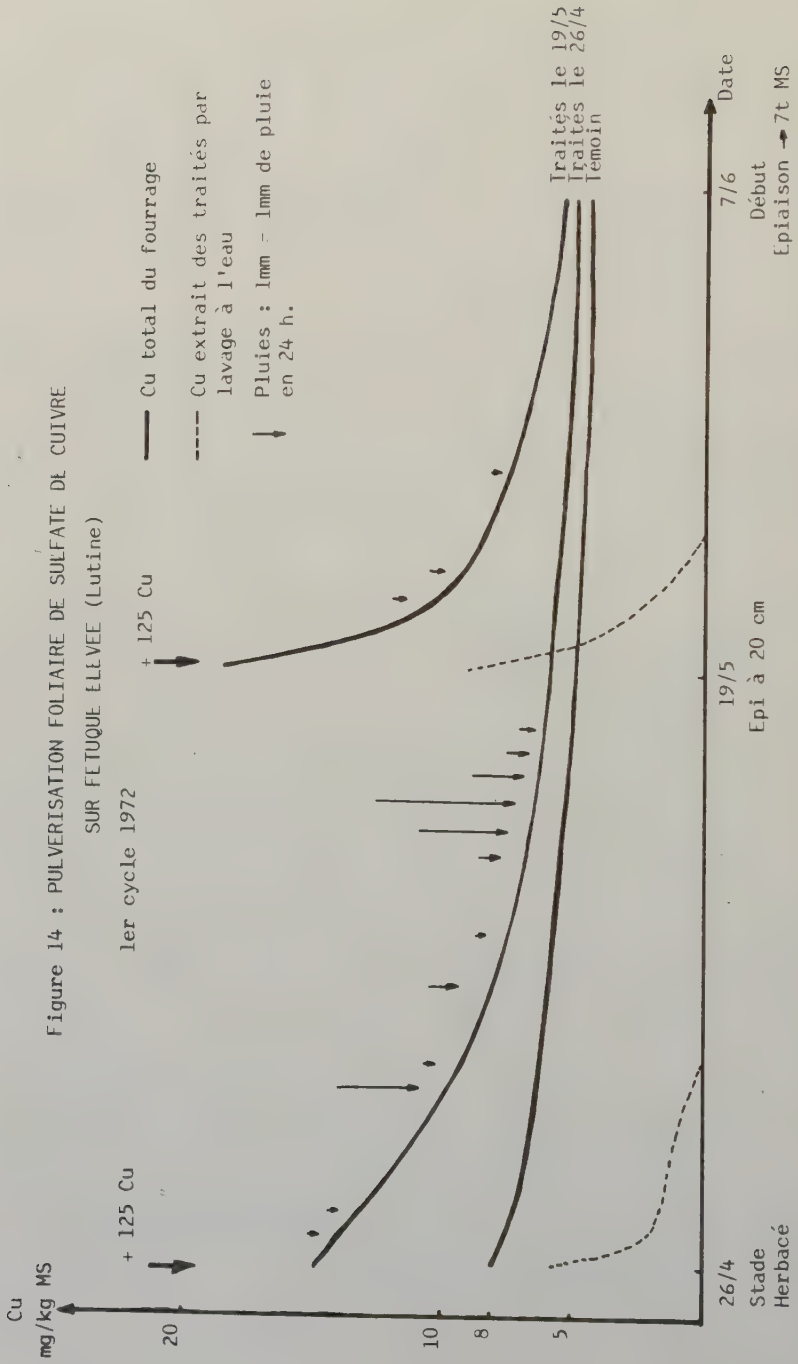


Figure 15 : PULVERISATION FOLIAIRE DE SELS DE CUIVRE

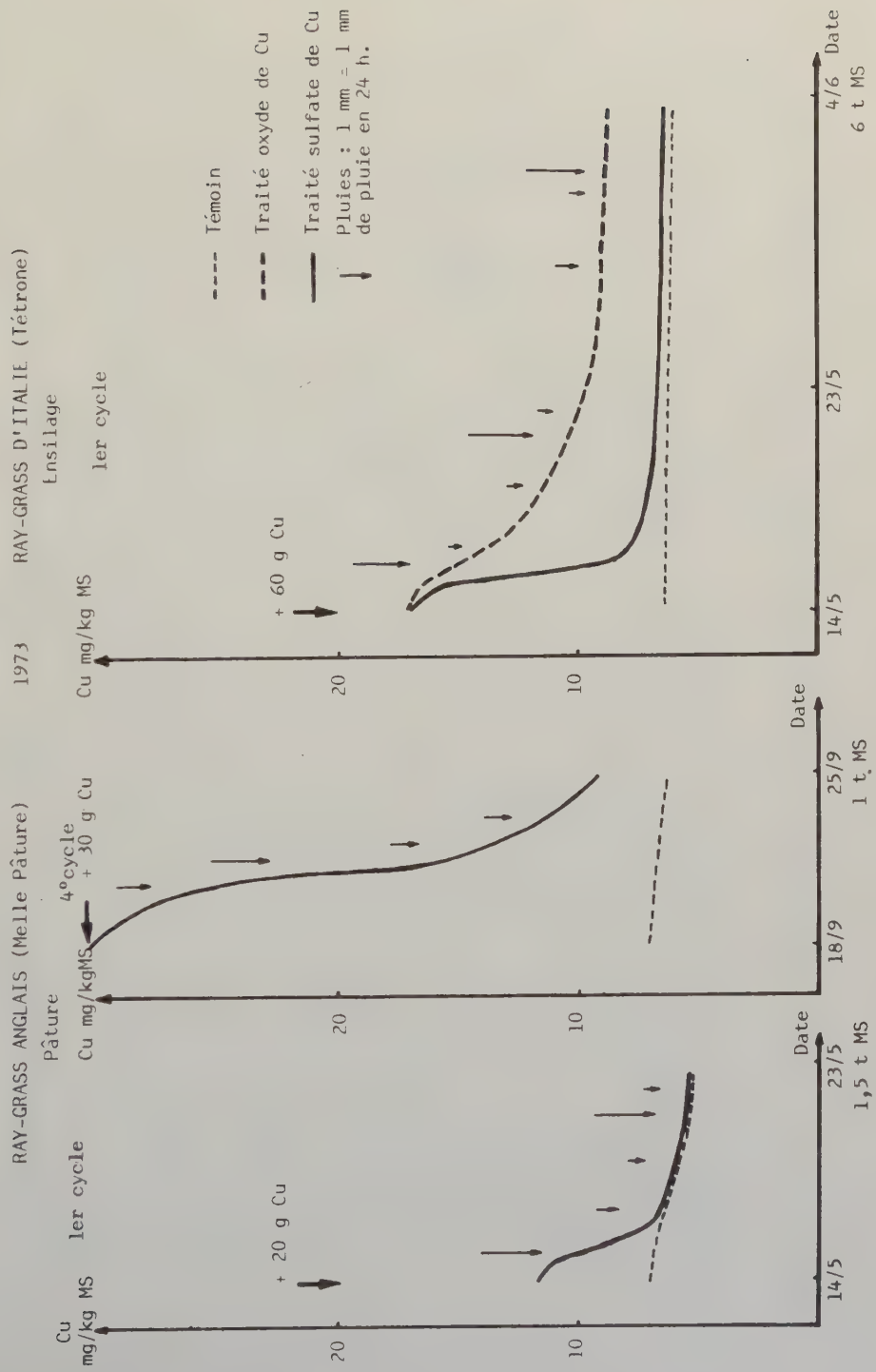
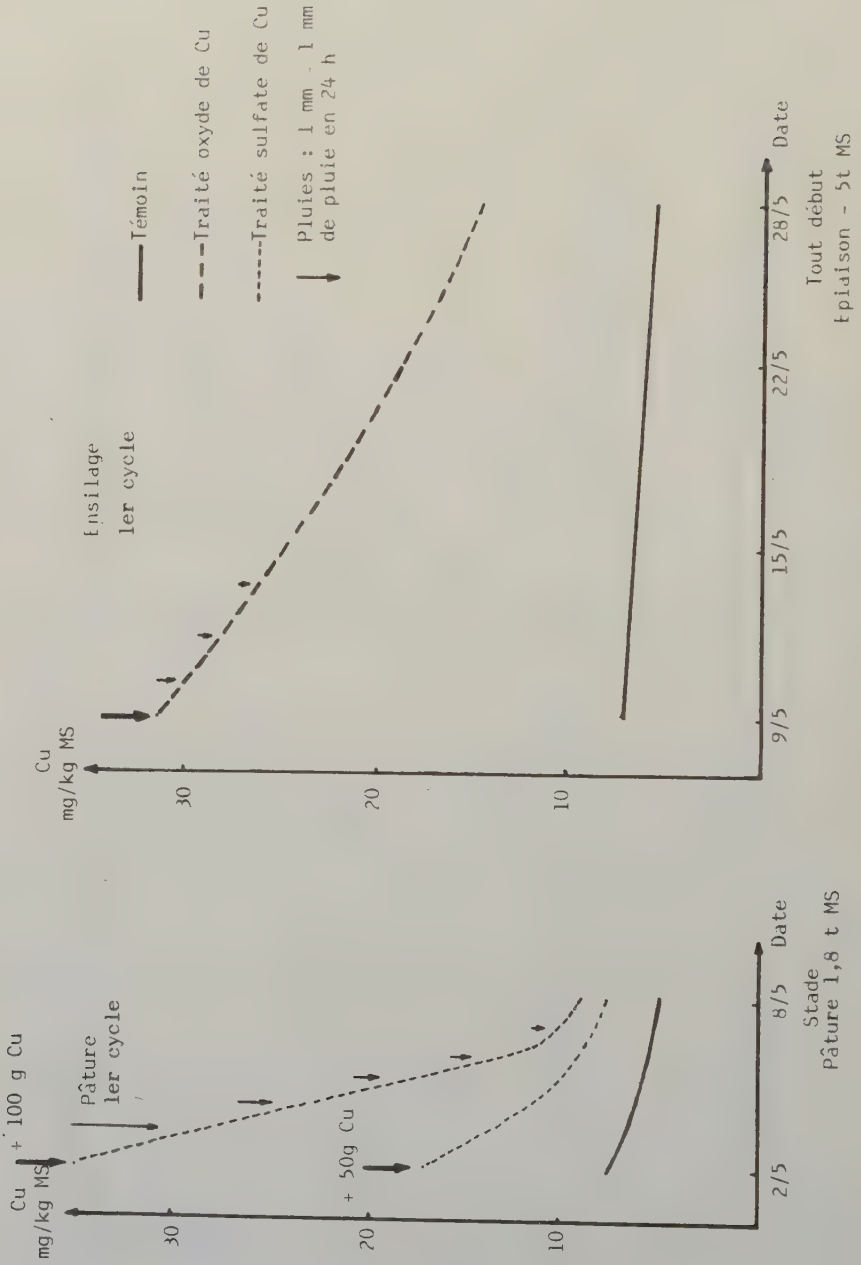


Figure 16 : PULVERISATION FOLIAIRE DE SELS DE CUIVRE SUR RAY-GRASS ANGLAIS
(Melle Pâtûre)



b.3.2 - Le sulfate neutralisé à l'eau de chaux permet d'utiliser des concentrations supérieures au sulfate pur, de 0,5 à 0,8 p.100 sans risque pour le végétal (38) ; ce qui autorise des apports en cuivre plus importants (150 g Cu/ha couramment) (43, 164).

Le calcium apporté conjointement a un effet favorable sur l'absorption du cuivre par les feuilles (89).

Les résultats obtenus sont meilleurs qu'avec le sulfate de cuivre pur.

- Les pulvérisations foliaires à dose faible (50 g Cu/ha) réalisées 4 à 5 jours avant le pâturage des animaux conduisent à des niveaux d'enrichissement satisfaisants dans l'ensemble (Tableau LVIII - Chateau Salin), pouvant même être excessifs pour des pâtures ovins (Tableau LVIII - Mirecourt). Des chutes de pluies importantes (18,2 mm entre le 27 mai et le 5 juin à Mirecourt en deuxième cycle (Tableau LVIII)) ont des effets néfastes et annulent pratiquement le bénéfice des pulvérisations (164).

- Avec des doses fortes (150 g Cu/ha) les taux de cuivre relevés sont excessifs au stade pâture mais pas toujours suffisants aux stades de la conserve (Tableau LVIII).

b.3.3 - L'oxyde de cuivre (CuO) et l'oxychlorure, présentés en suspension dans l'eau en présence d'un mouillant et d'un dispersant, sont des produits peu caustiques, autorisant des doses de 200 g Cu/ha sans risque pour la plante (38, 151, 154).

Sous ces formes chimiques insolubles, le cuivre est absorbé beaucoup plus lentement que le cuivre - sulfate (89). Mais il a l'avantage de ne pas être éliminé facilement par les pluies (figure 16, courbe de droite) et de rester ainsi longtemps disponible pour le végétal (154).

La décroissance des teneurs en cuivre du fourrage, dans les jours qui suivent la pulvérisation de sel insoluble, est plus lente qu'avec le sulfate de cuivre (figure 16, courbe de droite).

TABLEAU LX : Enrichissement en cuivre des fourrages par pulvérisations foliaires
Essai INRA Theix 1969 - 1973 - 1974

Plante	Cycle et stade à l'apport	Cuivre apporté g/ha	Intervalle pulvérisation : récolte	Pluies 3 premiers jours	Stade à la récolte	Cu mg/kg MS récolté		Efficacité pratique
						Total	Enrichissement	
MIXTE	1 : herbe	200	20		Ensilage	12	7	Bonne
	"	200	35		Foin	8	2,5	Faible
	2 (+ 7 sem.)	200	23		Pâturage	15	8	Bonne
	3 (+ 7 sem.)	200	18		Pâturage	16	7	Bonne
RGI Tétrone	1 fin herb.	60	21	12 mm	Fin montaison	8,5	3	Faible
	1 "	150	18	6 mm	Ensilage	14,1	7	Bonne
	1 "	150	13	36 mm	Ensilage	28,6	22	T. Bonne
	1 "	150	12	36 mm	Epi à 10 cm	32	28	Forte

Par ailleurs, les enrichissements obtenus sont importants et supérieurs, dans les mêmes conditions, au cuivre-sulfate non seulement aux stades précoces, mais aussi et surtout aux stades tardifs (ensilage et même foin) (Tableaux LVI et LX) (151, 154). Ils semblent même, à priori, excessifs puisque les taux de cuivre relevés aux stades pâture et ensilage dépassent souvent largement 15 et même 20 ppm/MS (Tableau LX)

Mais l'étude de la digestibilité du cuivre d'un tel fourrage enrichi par le cuivre-oxyde (113) a montré que celle-ci était environ 3 fois moindre que pour le cuivre-sulfate (5,8 p.100 contre 15 p.100). En conséquence, un fourrage ayant au départ une teneur de 5 mg Cu/kg MS aura le même effet sur l'animal lorsqu'il est enrichi de 5 mg/kg MS par du sulfate de cuivre, que lorsque son taux de cuivre est augmenté de 15 mg/kg MS par de l'oxyde de cuivre. Ce qui revient à dire que la teneur souhaitable d'un fourrage enrichi par le cuivre-oxyde est de 20 mg Cu/kg MS (113). Avec une telle concentration l'éleveur dispose de la même marge de sécurité qu'avec 10 mg Cu/kg MS obtenu par du sulfate.

L'oxyde permet donc une certaine souplesse dans les doses apportées en fonction du niveau de récolte prévue.

b.4 - Conséquences pratiques

La pulvérisation foliaire nécessite une intervention par cycle et du matériel adapté ; il faut obtenir une vraie micronisation fine (brouillard) et utiliser des volumes assez réduits pour ne pas entraîner la formation de gouttes tombant sur le sol, c'est-à-dire 300 à 500 litres maximum/ha (43, 149).

Mais cette technique permet, mieux que l'apport au sol, d'obtenir le niveau de cuivre que l'on désire dans le fourrage et présente donc une plus grande souplesse d'utilisation.

Toutefois il convient d'employer des doses et des formes de cuivre convenablement raisonnées en fonction de l'objectif poursuivi (pâture ou conserve), de la saison et des conditions météorologiques.

Pour des exploitations destinées à la pâture, la pulvérisation de 100 à 150g Cu/ha sous forme de sulfate, en premier cycle doit être faite 5 à 8 jours avant l'entrée des animaux dans la parcelle, quelle que soit l'importance de la végétation. Le sulfate neutralisé à la chaux est efficace à des doses plus faibles (50 g Cu/ha) mais doit être préparé juste avant emploi. L'opération est à annuler en cas de risque d'orages violents dans les 2, 3 jours car le fourrage ne sera pas enrichi ; ou bien il convient de remplacer le sulfate par de l'oxyde (80, 100 g Cu/ha).

Aux autres cycles la dose à apporter est à adapter à la vitesse de croissance de l'herbe : de 20 à 30 g Cu/ha en période de pousse ralentie (cycles de plein été sec) à 60, 70 g Cu/ha en période encore chaude mais humide (septembre) (43, 154).

Pour les exploitations de type fauche l'enrichissement doit être envisagé uniquement à partir des formes insolubles (oxyde ou oxychlorure), moins sensibles à la pluie et absorbées plus lentement. La quantité de cuivre à apporter doit tenir compte de la pousse de l'herbe prévue, c'est-à-dire, pratiquement, du stade de récolte envisagé.

Ainsi, pour les ovins, les doses recommandées à la suite des essais de l'INRA sont de (43, 149, 154) :

- 100 g Cu/ha si la récolte est prévue assez précoce
10 à 15 jours plus tard

- 150 g Cu/ha si elle doit être réalisée 15, 20 jours après la pulvérisation, au début épiaison (ensilage classique) et comprise entre 3 et 7 tonnes MS/ha.

- 200 g Cu/ha pour des fauches à foin tardives intervenant 20 à 35 jours après l'apport (début floraison)

- 80 g Cu/ha sur de dernier cycle.

La meilleure tolérance au cuivre des bovins permet d'utiliser sans danger pour eux des fourrages qui auraient reçu des doses un peu supérieures.

L'enrichissement des fourrages sur pied constitue un mode de prophylaxie séduisant. Mais, pour l'instant, les diverses techniques préconisées n'ont pas franchi le domaine de l'expérimentation. Il est nécessaire de passer à un stade ultérieur et d'élargir le champ d'action aux conditions réelles des exploitations agricoles, afin de vérifier "sur le terrain" l'efficacité de telles pratiques : une collaboration étroite entre les Eleveurs et la Recherche s'avère indispensable.

Le choix d'une méthode de prophylaxie ne peut être réalisé au hasard. Les problèmes de carence en cuivre (et autres oligo-éléments) doivent être vus à l'échelon local au niveau de l'exploitation. Il convient d'examiner les possibilités techniques et économiques de cette dernière, sa situation sanitaire, la valeur de ses fourrages, les types d'alimentation qu'elle a la possibilité de mettre en oeuvre ainsi que les modes de rationnement individuel ou collectif. On en déduira la ou les solutions à préconiser : il y aura autant de solutions que de cas particuliers. On ne peut recommander un mode unique de complémentation.

Toutefois, dans les grandes zones d'élevage où les animaux sont soumis à un même régime d'exploitation, il est possible d'uniformiser la prophylaxie sous forme d'un véritable plan régional, judicieusement raisonné et adapté.

C - PROPHYLAXIE ET TRAITEMENT DE L'INTOXICATION CUPRIQUE
=====

CHRONIQUE
=====

1 - Prophylaxie

Le problème ne se pose pas de la même façon en France et dans certains autres pays étrangers.

a - En France

Les teneurs en cuivre des fourrages, dans les conditions naturelles, ne semblent pas excessives, même dans des régions où le cuivre du sol est disponible (20).

Les excès de cuivre dans l'alimentation ne se rencontrent qu'à la suite d'une intervention humaine : aliment industriel ou concentré surdosés en cuivre ; erreur dans l'administration d'un composé calculé pour une catégorie précise d'animaux (aliment "porc" ou "bovin" distribué à des ovins, aliment "adulte" distribué à des "jeunes") ; erreur dans le calcul du complément minéral enrichi en oligo-éléments ; enrichissement excessif des fourrages sur pied par apport de cuivre.

Par conséquent, la prophylaxie est simple : il convient de respecter les normes alimentaires proposées par les spécialistes de la nutrition (Tableau L), en accordant une attention particulière aux rations ovins, et, à un degré moindre, jeune bovins. Pour les aliments industriels, il serait souhaitable que la composition en oligo-éléments soit mentionnée, dans tous les cas, par le fabricant.

b - A l'étranger

En plusieurs points du globe, les fourrages offerts aux animaux présentent, normalement, des taux moyens de cuivre excessifs : plus de 20 mg/kg MS et même parfois plus de 50 mg/kg MS ; c'est le cas notamment de certaines zones des USA, d'Angleterre, d'Irlande et d'Australie (XV).

Plusieurs chercheurs se sont penchés sur ce problème délicat et ont essayé de mettre sur pied des mesures visant à diminuer la rétention et l'utilisation du cuivre au niveau de l'animal par l'apport d'éléments antagonistes.

b.1 - Molybdène et soufre

L'addition de molybdate d'ammonium $((\text{NH}_4)_6 \text{MoO}_4, 2 \text{H}_2\text{O})$ et de sulfate de sodium $(\text{Na}_2 \text{SO}_4, 2 \text{H}_2\text{O})$ à la ration est une solution possible (78, 183) : ces composés limitent le stockage hépatique du cuivre (54, 55) et préviennent l'apparition de toxicité, sans modifier la croissance ou la qualité de la carcasse.

Mais il est difficile de recommander des quantités précises : celles-ci sont fonction du taux de cuivre dans la ration, du bilan cuprique de l'animal, des proportions respectives de molybdène et de soufre, ... et même de la race.

Ainsi Harker (78) obtient des résultats satisfaisants avec 24,4 mg Cu/kg MS dans la ration et 4,2 g S/kg MS en portant le taux de molybdène à 7,7 mg/kg MS. Suttle (183), pour une ration contenant 45,3 mg Cu/kg MS et ajustée à 2 g S/kg MS, préconise 8 et plutôt 16 mg Mo/kg MS.

b.2 - Zinc

Pour obtenir un effet suffisant il faut avoir recours à des quantités élevées en zinc.

Sur des moutons, 420 mg Zn/kg MS sont nécessaires pour réduire l'accumulation hépatique de 40 p.100 par rapport aux animaux témoins (43 mg Zn/kg MS), mais il s'ensuit une légère anémie (27).

De telles solutions constituent des extrêmes qu'il est prudent d'éviter chaque fois que cela est possible :

- les quantités d'éléments antagonistes à apporter sont à adapter à chaque cas : elles peuvent être ou trop faible (inefficacité de la prophylaxie), ou trop fortes et conduire à des carences conditionnées.

- l'introduction dans la ration d'interférences mal contrôlées risque de perturber l'équilibre alimentaire et de provoquer, à plus ou moins long terme, des accidents (carence en phosphore par excès de molybdène ...).

2 - Le Traitement

Les aliments sont pulvérisés avec une solution aqueuse, composée de 50, 100 mg de molybdate d'ammonium (ou de sodium) et 1,5 à 5 g de sulfate de sodium, pour chaque mouton et par jour. Le traitement est répété tous les jours pendant 1 à 3 semaines, et il n'est pleinement efficace que si il est entrepris avant la crise hémolytique.

On peut adjoindre aussi de la Vitamine B 12 sur les sujets déjà malades.

CONCLUSION

L'étude du cuivre en tant qu'oligoélément constitue un cas particulier, précis et limité mais complet, de la chaîne sol - plante - animal. Si, en condition d'élevage extensif, les déséquilibres minéraux apparaissant au niveau de l'animal sont étroitement liés aux caractéristiques géochimiques des sols, de telles relations deviennent plus élastiques, en élevage intensif, sous l'influence des facteurs humains : c'est ainsi que les pratiques agronomiques modernes (fertilisation massive, choix des espèces à haut rendement) et la recherche de performances animales toujours plus poussées (sélection génétique) ont largement contribué à l'apparition ou à l'extension de carence en cuivre sur les ruminants, dans des zones où elle était ignorée. Cela semble être le cas en France : les enquêtes montrent que les fourrages que nous obtenons par les méthodes perfectionnées de l'intensification fourragère sont, d'une manière générale, insuffisamment pourvus en cuivre pour satisfaire les besoins des transformateurs biologiques améliorés, mais plus exigeants, que sont nos types actuels de ruminants domestiques.

En conséquence, ces animaux seraient, un peu partout sur notre territoire, exposés à des carences ou plutôt des subcarences en cuivre, lesquelles, selon nos connaissances actuelles, entraîneraient d'une manière constante des déficits de production (diminution de l'appétit, de la croissance, de la production laitière, de la fertilité, de la vitalité).

Dans ces conditions les investissements et les efforts consentis en vue de l'intensification de la production auraient des résultats inférieurs à ceux que nous pourrions espérer. Dans un contexte économique difficile nous devons pourchasser tout gaspillage et lever toute contrainte venant obérer les coûts de production.

La carence en cuivre représente une des entraves à la bonne gestion des élevages. Les praticiens doivent donc la rechercher activement, d'autant plus que les signes sont insidieux, et mettre en oeuvre des mesures palliatives préconisées par la Recherche.

Toutefois, nous ne possédons que de rares informations sur l'ordre de grandeur des pertes directes et indirectes entraînées par les carences en cuivre, ainsi que sur l'influence des remèdes dans le comportement zootechnique des animaux : le véritable test économique n'a pas vu le jour.

Pour l'instant les solutions proposées sont basées sur des expérimentations localisées visant la couverture théorique des besoins ; or nous savons que ceux-ci sont difficiles à apprécier en particulier à cause des interférences multiples mal dominées.

Il apparaît donc nécessaire qu'une expérimentation nouvelle, au niveau même des exploitations agricoles, par comparaison des performances d'animaux traités et de témoins soit mise en oeuvre. Ce type d'étude permettrait, d'une part de préciser, compte tenu des caractéristiques de l'exploitation et des sols, dans quelles situations et à quelles conditions il convient d'utiliser les diverses méthodes prophylactiques préconisées ; d'autre part de justifier une politique de prévention des carences aboutissant à une meilleure rentabilité des élevages. Une étroite collaboration Recherche-Praticiens-Éleveurs est indispensable pour atteindre un tel but.

Vu :

LE DIRECTEUR

de l'École Nationale Vétérinaire de Lyon,

[Signature]

~~LE DOYEN~~

LE PROFESSEUR RESPONSABLE
de l'École Nationale Vétérinaire,

[Signature]

LE PRÉSIDENT DE LA THÈSE,

[Signature]

Vu et permis d'imprimer

LYON, le **13 NOV. 1979**

19

LE ~~PRÉSIDENT~~ DE L'UNIVERSITÉ LYON II

[Signature]

D. GERMAIN



BIBLIOGRAPHIE

- I - Agricultural Research Council : " The nutrient requirements of farm livestock" N° 2 Ruminants Ed. A.R.C. Londres 1965.

- II - Duchaufour P. : "Précis de Pédologie" Ed. Masson et Cie, Paris 1965

- III - F.A.O. 1961 : Cooperative research project on trace elements of the subcommission on Agricultural research of the European Commission on Agriculture. Rapport Congrès de Dublin 1959, 61 p.

- IV - Gallagher C. H. : " Nutritional factors and enzymological disturbances in animal" C. Lockwood and son ed., Londres 1964.

- V - "Intestinal absorption of Metal-ions, Trace elements and Radionucléides" S. C. Skoryna and D. Waldron-Edward. Ed. Pergamon Press, New York 1971, 431 p.

- VI - "Les acquisitions récentes sur les carences en oligo-éléments du sol aux ruminants". C. R. des septièmes journées d'information du "grenier de Theix", Nov. 1974. Bull. Tech., I.N.R.A. - C.R.Z.V. N° spécial Sept. 1975. Ed. S.E.I., I.N.R.A. - C.N.R.A., Versailles.

- VII - "Molybdenum in the environment" Vol. 1 : "The biology of Molybdenum" W.R. Chappell and K.K. Petersen. Marcel Dekker I.N.C. New York and Basel, 1976.

- VIII - Proceedings of the 1st International Symposium on
"Trace Element Metabolism in Animals", Aberdeen 1969.
C.F. Mills. Ed. Livingstone, Edinburgh and London
1970, 550 p.
- IX - Proceedings of the 2nd International Symposium on
"Trace Element Metabolism in Animals", Edited by
W.G. Hoekstra, J.W. Suttie, H.E. Ganther and W.
Mertz University Park Press Baltimore, 1974.
- X - Proceedings of the 3rd International Symposium on
"Trace Element Metabolism in Man and Animals",
Freising July 1977 - M. Kirchgessner, Institut für
Ernährungsphysiologie - Technische Universität
München, Freising, Weihenstephan.
- XI - Russel F.C. and Duncan D.L. : "Minerals in pasture :
deficiencies and excess in relation to animal health"
C.A.B., Commonwealth Bur. anim. nutrit., Tech. Com.,
N° 15, 1956, 170 p.
- XII - "The Biochemistry of Copper" Peisach J., P. Aisen and
W.E. Blumberg. Ed. Academic Press, New York and London,
1966, 588 p.
- XIII - "Trace element in Soil - Plant - Animal systems" Edited
by D.J.D. Nicholas and A.R. Egan. Academic Press New
York and London 1975.
- XIV - Underwood E.J. "The mineral nutrition of livestock"
Chapter 8. Food and Agricultural Organisation.
Farnham Royal : Comm. Agric. Bur. 1966.
- XV - Underwood E.J. "Trace element in human and animal nu-
trition" Academic Press, New York and London, 3 rd
edition 1971.

- XVI - "United States - Canadian Tables Of Feed Composition"
Washington D.C. ; National Academy of Science - National
Research Council, Publication 1684, 1969.
- XVII - Varley H. "Practical Clinical Biochemistry" 3rd edition
Heinemann London, 1964.

- 1 - ALLCROFT R. 1952 : Conditioned Copper deficiency in sheep and cattle in Britain. *Veterinary Record*, 64, 17 - 24.
- 2 - ALLCROFT R. and UVAROV O. 1959 : Parenteral administration of Copper Compounds to cattle with special reference to copper glycinate (Copper Amino Acetate). *Veterinary Record* 71, 797.
- 3 - ALLEXANDER G.I. and HARVEY J.M. 1957 : A survey of the incidence of Copper deficiency in dairy cattle in coastal queensland, south of Brisbane. *Queensland J. Agric. Sci.* 14 (1), 23 - 27.
- 4 - ALLEXANDER G.I., HARVEY J.M., LEE J.H. and STUBBS W.C. 1967 : Studies on Copper and Cobalt therapy of Cattle in Central Coastal Queensland. *Austral. J. Agric. Res.*, 18, 169 - 181.
- 5 - AMBOULOU D. and LAMAND M. 1977 : Effet of grinding and pelleting of hay on Copper metabolism in sheep : study with radioactive Copper. *Ann. Rech. Vét.*, 8 (2), 121-127.
- 6 - AMBOULOU D. and LAMAND. M. 1977 : Variation in the digestibility of trace elements (Cu, Zn, Mn) during the first cycle of cocksfoot growth. *Ann. Rech. Vét.* 8 (3) 241-249.
- 7 - AMBOULOU.D., LAMAND M. and RAYSSIGUIER Y. 1977 : Chopping versus grinding and pelleting of hay : effect on availability of trace elements (Cu, Zn, Mn) and major elements (Ca, P and Mg). *Ann. Rech. Vét.*, 8 (1), 1-6.
- 8 - ANKE M. 1965 : Der Mengen und Spurenelementgehalt des Rinderhaares als Indikator der Calcium, Mg, P, K, Na, Eisen, Zinc, Mangan, Kupfer, Molybdän und Kobaltversorgung. *Arch. für Tierernähr.*, 15, 461-468 und 469-485.
- 9 - ANKE M. 1966 : *Arch. für Tierernähr.*, 16, 199.

- 10 - ANKE M, SASUM K., OLL U. und GRAUPE B. 1962 : De la composition de la luzerne en relation avec les sols (formations géologiques). Arch. für Tierernähr., 12 (2), 93-108.
- 11 - BARLOW R.M. 1963 : Further observations on sway-back ; II Histochemical localization of Cytochrome oxidase activity in the Central Nervous System. J. Comp. Pathol. Therap., 73, 51 et 61.
- 12 - BARLOW R.M. 1964 : Scott. Agric. 1964.
- 13 - BARLOW R.M., FIELD A.C. and GANSON N.C. 1964 : Measurement of nerve cell damage in the spinal cord of lambs affected with swayback. J. Comp. Pathol. Therap., 74, 530.
- 14 - BECKER R.B., DIX ARNOLD P.T., KIRK W.G., DAVIES G.K. and KIDDER R.W. 1957 : Mineral for dairy and beef cattle. Univ. Florida, Agric. Exper. Station, Bull 513 A.
- 15 - BEINERT M. 1966 : In (XII). (Ed. Academic Press, New York and London).
- 16 - BELLANGER J. 1968 : Relation entre les taux de cuivre sanguin, hépatique et pilaire chez 250 bovins d'abattoirs. Ann. Rech. Vétér., 1, 127-139.
- 17 - BELLANGER J. 1971 : Dosage des Oligoéléments dans les fourrages. Ann. Nutr. Alim., 25 (5), B59-B96.
- 18 - BELLANGER J. et LAMAND M. 1975 : Méthode de dosage du cuivre et du zinc plasmatiques. Bull. Techn. n° 20, C.R.Z.V. Theix I.N.R.A., juin 1975, 53-54.
- 19 - BELLANGER J., LAMAND M. et PERIGAUD S. 1970 : La carence en cuivre chez les ruminants. Ann. Nutr. Alim., 24, 1-62.
- 20 - BELLANGER J., PERIGAUD S. et LAMAND M. 1973 : Carence en oligoéléments chez les ruminants en France. III. Eléments d'enquête obtenus par les analyses de fourrages. Ann. Rech. Vétér. 4 (4), 565-598.

- 21 - BENNETTS H.W. and CHAPMAN F.E. 1937 : Copper deficiency in sheep in Western Austria : a preliminary account of the Aetiology of enzootic ataxia of lambs and an anaemia of ewes. Australian Veter. Journal, 13, 138.
- 22 - BINGLEY J.B., CARILLO B.J. y RUSKAN B.E. 1964 : efecto de dos niveles de dosificación de cobre inyectable de absorción lenta, sobre la concentración de cobre en hígado y sangre de bovino. Revista de investigaciones Agropecuarias, 1 (6), 119-126.
- 23 - BINGLEY J.B. and DUFTY J.H. 1972 : Distribution of copper in the tissues of the bovine neonate and Dam. Research in Veterinary Science, 13 (1), 8-14.
- 24 - BINGLEY J.B. and DUFTY J.H. 1973 : The concentration of copper in whole blood, plasma and erythrocytes of hereford cattle during pregnancy. Res. Vet. Sci., 15, 379-380.
- 25 - BINNERTS W.T. 1977 : endogenous Copper loss in Cows : its origin mainly in the stomach system. In TEMA 3 (X), p. 136-139.
- 26 - BLANC D. et OTTO C. 1975 : influence de la dose et de la forme d'azote sur les teneurs en cuivre de différentes graminées fourragères. Dans (VI), p. 112-119.
- 27 - BREMNER J., YOUNG B.W. and MILLS C.F. 1976 : protective effect of zinc supplementation against copper toxicosis in sheep. British Journal of Nutrition, 36, 3.
- 28 - BROCHARD M. 1975 : Oligoéléments et fertilité. Dans (VI), p. 82-85.
- 29 - BROCHARD M. 1975 : Qu'attendre de l'analyse chimique des poils ? Elevage Bovin n° 12, 53-58.
- 30 - BROOKS D.W. and DAWSON C.R. 1966 : In (XII), (Ed. Academic Press, New York and London).

- 31 - BUTLER E.J. and BARLOW R.M. 1963 : Factors influencing the blood and plasma copper levels of sheep in swayback flocks. J. Comp. Pathol. Therap., 73, 107-118.
- 32 - BUTLER E.J. and BARLOW R.M. 1963 : copper deficiency in relation to swayback in sheep I : effect of molybdenum and sulphate supplements during pregnancy. J. Comp. Pathol. Therap., 73, 208-213.
- 33 - CARNES W.H. 1971 : Role of copper in connective tissue metabolism. Federation Proceeding, Vol. 30 (3), 995-1000.
- 34 - CHAPMAN H.L., BELL J.R. and M.C. 1963 : Relative absorption and excretion by beef cattle of copper from various sources. J. Anim. Sci., 22, 82-85.
- 35 - CHAPMAN H.L. and KIDDER R.W. 1964 : Copper and Cobalt for beef cattle. University of Florida, Agric. Exper. Station, Bull. 674.
- 36 - CHOU W.S., SAVAGE J.E. and O'DELL B.L. 1969 : J. Biol. Chem., 244 (21), 5785.
- 37 - CLEVELAND L., COFFMAN R.E., COON P. and DAVIS L. 1975 : An investigation of the role of Copper in the galactose oxidase. Biochemistry, 14, 1108.
- 38 - COPPENET M. 1968 : Les oligoéléments. Bull. Techn. Inf. 231, 595-608.
- 39 - COPPENET M. 1968 : La fertilité du sol et la nutrition des plantes. Colloque Franco-Roumain, Bucarest 1968.
- 40 - COPPENET M. 1970 : Effets des sels de cuivre et de cobalt sur l'enrichissement des plantes fourragères en ces deux oligoéléments. C.R. Acad. Agriculture Française, 56 (13), 923-937.

- 41 - COPPENET M. et CALVEZ J. 1956 : Sur l'origine des carences en cuivre C.R. du VIème Congrès International Science-Sol, 2 (13), 493-497.
- 42 - COPPENET M. ET CALVEZ J. 1967 : Les oligoéléments et en particulier le cobalt dans les sols et les fourrages du Finistère. C.R. Acad. Agric., 53 (12), 939-947.
- 43 - COPPENET M. et PERIGAUD S. 1975 : Possibilités d'enrichissement en oligoéléments du maïs et des fourrages sur pied ; Apports au sol et pulvérisations foliaires. Dans (VI), p. 98-111.
- 44 - CRAMPTON R.F., MATTHEWS D.M. and POISNER P. 1965 : Observations on the mechanism of absorption of Copper by the small intestine. Journal of Physiology, 178, 111-126.
- 45 - CUNHA T.J., SHIRLEY R.L., CHAPMAN H.L., AMMERMAN C.B., DAVIS G.K., KIRK W.G. and HENTGES Jr.J.F. : University of Florida, Agric. Exper. Station, Bull 683.
- 46 - CUNNINGHAM I.J. 1946 : Copper deficiency in cattle and sheep on Peat Lands. New Zealand J. Sci. Technol., 27A, 372 et 381-396.
- 47 - CUNNINGHAM I.J. 1950 : In "Symposium on Copper metabolism" p. 246 W.D. Mac Elroy and B. Glass. Ed. ; John Hopkins Press : Baltimore, Maryland 1950.
- 48 - CUNNINGHAM I.J. 1955 : Advance in Veterinary Science, 2, 138.
- 49 - CUNNINGHAM I.J. 1957 : Parenteral administration of copper as glycinate to cattle and sheep. New Zealand Veterinary Journal, 5, 9-16.
- 50 - CUNNINGHAM I.J. and HOGAN K.G. 1958 : The influence of diet on the Copper and Molybdenum contents of hair, hoof and wool. New Zeal. J. Agric. Res., 1, 841-846.

- 51 - DAUTRIA J.M. 1970 : Contribution à l'étude de la dynamique pédologique de quelques éléments majeurs et mineurs en milieu granitique de la zone tempérée humide. Thèse doct. de spécialité, Fac. de Clermont-Ferrand.
- 52 - DELAS 1961 : J. Bull. A.F.E.S., 3, 152.
- 53 - DEWEY D.W. 1977 : An effective methode for the administration of trace amounts of copper to ruminants. SEARCH (Austria), Vol. 8, 326-327.
- 54 - DICK A.T. 1953 : The control of Copper storage in the liver of sheep by inorganic sulphate and Molybdenum. Australian Veterinary Journal, 29, 233.
- 55 - DICK A.T. 1954 : Austr. Veter. J., 30, 196.
- 56 - DICK A.T. 1954 : Austr. J. Agric. Res., 5, 511-544.
- 57 - DICK A.T. 1956 : In "Inorganic Nitrogen Metabolism" p. 445 W.D. Mac Elroy and B. Glass ed. ; John Hopkins Press : Baltimore Maryland, 1956.
- 58 - DICK A.T. and BULL L.B. 1945 : Some preliminary observations on the effect of molybdenum on Copper metabolism in herbivorous animals. Austr. Vet. J., 21, 70.
- 59 - DICK A.T., DEWEY D.M. and GAWTHORNE J.M. 1975 : J. Agric. Sci., 85, 187.
- 60 - DOWDY R.P. and MATRONE G. 1968 : Copper - Molybdenum interaction in sheep and chicks. Journal of Nutrition 95, 191-196.
- 61 - DROUINEAU G. et MAZOYER R. 1962 : Contribution à l'étude de la toxicité du cuivre dans les sols. Annales Agronomiques, 13 (1), 31-53.

- 62 - EVANS G.W. and HAHN C. 1974 : Albumin as a possible site for copper - Zinc interaction. In TEMA 2 (IX) p. 497-499.
- 63 - EVANS G.W. and JOHNSON P.E. 1977 : Copper and Zinc-binding Ligands in the intestinal mucosa. In TEMA 3 (X), p. 98-105.
- 64 - EVANS G.W., MAJORS P.F. and CORNATZER W.E. 1970 : Mechanism for Cadmium and Zinc antagonism on Copper metabolism. Biochemical and Biophysical Research communications, 40, 1142-1148.
- 65 - FELL B.F., MILLS C.F. and BOYNE R. 1965 : Cytochrome oxidase deficiency in the motor neurones of copper deficient lambs : an histochemical study. Res. Vet. Sci., 6, 170-177.
- 66 - FLEMING G.A. 1963 : Distribution of major and trace elements in some common pasture species. J. Sci. Food Agric. 14 (3), 203-208.
- 67 - FLEMING G.A. 1965 : Trace elements in plants with particular reference to pasture species. Outl. Agric., 4, 270-285.
- 68 - FLEMING G.A. and MURPHY W.E. 1968 : The uptake of some major and trace elements by grasses as affected by season and stage of maturity. J. Brit. Grassl. Soc., 23 (2), 174-185.
- 69 - FLEMING G.A. and RYAN P. 1964 : 8th International Congress Soil-Science, Bucarest 1964 ; IV, 297.
- 70 - FRENS A.M. 1958 : Physiological aspects of the nutrition of grazing cattle. General Report n° 2/A, European Association for Animal Production.
- 71 - FRIEDEN E. 1974 : The biochemical evolution of the Iron and Copper protein. In TEMA 2 (IX), p. 105-118.
- 72 - FRIEDEN E. 1977 : Modes of metal metabolism in Mammals. In TEMA 3 (X), p. 8-14.

- 73 - FRIEDEN E. 1977 : Ceruloplasmin a multifunctional metalloprotein. In TEMA 3 (X), p. 36-39.
- 74 - FRIEDEN E. and HSIEH H.S. 1976 : Ceruloplasmin : the Copper transport protein with essential oxidase activity. "Advance in Enzymology and related area of molecular biology" Vol. 44, p. 187-233. Published by J. Willey and son.
- 75 - GAWECKI K.C., ILECKI J.H. and PONIKIEWSKA T.J. 1968 : Content of trace element in forage crops in relation to the stage of development of the plants, the method of gathering and storage. Final Report period from 10-4-1963 to 30-6-1968, Poznan.
- 76 - GREGORY E.M. and FRIODOVICH I. 1974 : Superoxidase Dismutases : properties, distribution and functions. In TEMA 2 (IX), p. 486-488.
- 77 - GUEGUEN L. 1971 : La composition minérale du lait et son adaptation aux besoins minéraux du jeune. Ann. Nutr. Alim., 25, A335-A381.
- 78 - HARKER D.B. 1976 : The use of Molybdenum for the prevention of nutritional Copper poisoning in housed sheep, Veterinary Record; 99 (5) 78-81.
- 79 - HARRIS E.D. 1976 : Copper induced activation of aortic lysyl oxidase in vivo. Proc. Nat. Acad. Sci. USA 1973, Vol. 73 N° 2, 371-374.
- 80 - HARTMANS J. 1969 : The detection of Copper deficiency and other trace element deficiencies under field conditions. In TEMA 1 (VIII), p. 441-448.
- 81 - HARTMANS J. and BOSMAN M.S.M. 1969 : Differences in the Copper status of housed and grazing cattle and their biochemical backgrounds. In TEMA 1 (VIII), p. 362-366.

- 82 - HARTMANS J., HEMKES O.J., VAN KLUYVE J.J. und WESTERHUIS J.M. 1972 : La teneur en sulfate de cuivre des pierres à lécher pour la prophylaxie des carences en cuivre chez les bovins. *Tijdschr. Diergeneesk.*, 97, 1222-1228.
- 83 - HARVEY J.M. and SUTHERLAND A.K. 1953 : Parenteral Copper therapy in Ruminants. *Australian Veterinary Journal*, 29, 261.
- 84 - HAVRE G.N., DYNNA O. and ENDER F. 1960 : The occurrence of simple and conditioned copper deficiency in cattle and sheep in Setesdalen (a valley in southern Norway) *Acta Veterinaria Scandinavica* 1, 250-276.
- 85 - HEMINGWAY R.G. 1962 : Copper, Molybdenum, Manganese and Iron contents of herbage as influenced by fertiliser treatments over a three year period. *J. Brit. Grassl. Soc.*, 17 (3), 182-187.
- 86 - HEMINGWAY R.G., BROWN N.A. and INGLISS J.S.S. 1962 : *Research in Veterinary Science*, 3, 348.
- 87 - HEMINGWAY R.G., Mac PHERSON A., DUTHIE A.K. and BROWN N.A. 1968 : The mineral composition of hay and silage grown in Scotland in relation to the A.R.C. standards for the mineral requirements of dairy cattle. *J. Agric. Sci. Camb.*, 71 (1), 53-60.
- 88 - HEMINGWAY R.G., Mac PHERSON A. and RITCHIE N.S. 1969 : Improvement in the copper status of ewes and their lambs resulting from the use of injectable copper compounds. In *TEMA 1 (VIII)*, p. 264-267.
- 89 - HENRY M. 1974 : Contribution à l'étude de la migration et de la distribution du cuivre apporté par voie foliaire chez le maïs (*Zea Mays L.*) en vue d'un enrichissement en cuivre des parties aériennes. Thèse doct. spécialité, Université de Clermont-Ferrand.

- 90 - HODGSON J.F. 1963 : Chemistry of micronutrient elements in soils. *Advance in Agronomy*, 15, 119-154.
- 91 - HSIEH H.S. and FRIEDEN E. 1975 : Evidence for ceruloplasmin as a copper transport protein. *Biochemical and Biophysical Research Communication*, 67 (4), 1326.
- 92 - HUISINGH J. and MATRONE G. 1976 : Interactions of Molybdenum in animal nutrition. In (VII), p. 125-148.
- 93 - INNES J.R.M. and SHEARER G.D. 1940 : "Swayback", a demyelinating disease of lambs with affinities to schilder's encephalitis in man. *J. Comp. Pathol. Therap.*, 53, 1-39.
- 94 - ISHMAEL J., Mac HOWELL J.C., TREEBY P.J. and BRAMLEY P.S. 1977 : Copper methionate for parenteral Copper therapy in sheep. *Veterinary Record*, 101, 410.
- 95 - ISHMAEL J., TREEBY P.J. and Mac HOWELL J.C. 1969 : Lesions found in ewes which have died following the administration of copper-Calcium Edetate for prevention of swayback. In *TEMA 1 (VIII)*, p. 268-272.
- 96 - JUSTE C. 1975 : Importance du Molybdène et de certains amendements riches en oligoéléments sur le développement et la qualité de la luzerne : utilisation en vue de l'alimentation animale. Dans (VI), p. 151-159.
- 97 - KARCHER D. 1962 : *Bulletin Société Royale de Zoologie d'Anvers*, 24.
- 98 - KERQUELEN M. 1960 : Aspects des variations de la composition de quelques fourrages en fonction des espèces, des stades de végétation, des conditions du sol et de fertilisation. *Annales Amélioration des Plantes*, 10, 177-236.

- 99 - KERGUELEN M. 1962 : Valeur minérale de l'herbe en oligo-éléments. Influence du sol et de la fumure sur la composition minérale. Fourrages, 10, 63-71.
- 100 - KIRCHGESSNER M. 1959 : Z. Tierphysiol. Tierernährung Futtermittelk, 14, 278.
- 101 - KIRCHGESSNER M. 1965 : Availability of some trace elements Proc. Nutr. Soc., 24, 89-99.
- 102 - KIRCHGESSNER M. and GRASSMAN E. 1969 : The dynamics of Copper absorption. In TEMA 1 (VIII), p. 277-285.
- 103 - KIRCHGESSNER M. und WESER U. 1965 : Z. Tierphysiol. Tierernährung Futtermittelk, 20, 44-261 et 317.
- 104 - KOOPMAN J.J. and WIJBENGA A. 1977 : Comparaisons of the efficacy of Copper injections of different Compounds in cattle with "low copper status". In TEMA 3 (X), p. 480.
- 105 - KUBOTA J., LAZAR V.A., LANGAN L.N. and BEESON K.C. 1961 : The relationship of soils to molybdenum toxicity in cattle in Nevada. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 25 (3), 227-232.
- 106 - LAMAND M. 1974 : Etiopathogénie des carences en oligo-éléments dans les ensilages de maïs enrichis en urée et en soufre. Annales de Recherche Vétérinaire, 5 (3), 281-289.
- 107 - LAMAND M. 1974 : Risques de carences en oligoéléments chez les jeunes ruminants recevant un aliment d'allaitement. Bulletin Technique n° 16, Juin 1974, CRZV Theix.
- 108 - LAMAND M. 1975 : Utilisation métabolique et digestive des oligoéléments ; les besoins de l'adulte et du jeune. Dans "les minéraux et les vitamines", Paris 16 et 17 Oct. 1975. Ed. le Point Vétérinaire, Maisons Alfort. Tome 1, p. 123-134.

- 109 - LAMAND M. 1975 : Pathologie des carences et des excès d'oligoéléments. Dans "les minéraux et les vitamines", Paris 16 et 17 oct. 1975. Ed. le Point Vétérinaire, Maisons Alfort. Tome 1, p. 135-142.
- 110 - LAMAND M. 1975 : Le diagnostic des carences en oligo-éléments. Dans "les minéraux et les vitamines", Paris 16 et 17 oct. 1975. Ed. Le Point Vétérinaire, Maisons Alfort. Tome 1.
- 111 - LAMAND M. 1975 : Notions de digestibilité et teneurs recommandées dans la ration : prophylaxie et traitement. Dans (VI), p. 90-97.
- 112 - LAMAND M. 1975 : Symptômes de carence et rôle des oligo-éléments chez l'animal. Diagnostic clinique. Dans (VI), p. 9-12.
- 113 - LAMAND M. 1976 : Complémentation en oligoéléments des ruminants à partir des fourrages enrichis sur pied ; II : digestibilité des éléments apportés. Bull. Techn. C.R.Z.V. Theix I.N.R.A., n° 25, 45-49.
- 114 - LAMAND M. 1978 : Les besoins de la vache laitière en oligoéléments. Bulletin des G.T.V., Juillet 1978.
- 115 - LAMAND M. 1978 : Copper deficiency prophylaxis in grazing sheep by copper oxide injection. Ann. Rech. Vet. 9 (3).
- 116 - LAMAND M. 1978 : Copper and Zinc deficiencies treatment by intramuscular injections in sheep. Ann. Rech. Vet., 9 (3).
- 117 - LAMAND M., BELLANGER J. et GEAY Y. 1969 : Carence en cuivre chez des taurillons à l'engrais ; son influence sur la croissance et son traitement. Annales de Zootechnie, 18 (2), 227-229.

- 118 - LAMAND M., BELLANGER J. et TRESSOL J.C. 1976 : Teneurs en oligoéléments de quelques aliments complémentaires pour ruminants. Bull. Tech. C.R.Z.V. Theix I.N.R.A., n° 26, 15-19.
- 119 - LAMAND M., DEMARQUILLY C. et MARQUIS B. 1972 : Possibilités de prophylaxie des carences en oligoéléments chez les bovins par blocs à lécher. Bull. Tech. C.R.Z.V. Theix I.N.R.A., N° 8, 31 - 34.
- 120 - LAMAND M. et PERIGAUD S. 1973 : Carences en oligoéléments en France chez les ruminants. I : Eléments d'enquête obtenus dans la pratique vétérinaire. Ann. Rech. Vét. 4 (4), 513-534.
- 121 - LASSISTER J.W. and BELL M.C. 1960 : Availability of copper to sheep from Cu 64 labelled inorganic compounds. J. Anim. Sci., 19 (3), 754-762.
- 122 - LOVSTAD R.A. 1972 : Interaction of ceruloplasmin with L. and D. DOPA. Acta Chemica Scandinavica, 26,2832-2836.
- 123 - LUNDBLAD K., SVANBERG O. and EKMAN P. 1949 : Availability and fixation of copper in Swedish soils. Plant and Soil, 1 (4), 277-301.
- 124 - LUPINOVITCH I.S. et DUBIKOVSKII G.R. 1967 : Soviet Soil Science, 12, 1632.
- 125 - MAC COSKER P.J. 1968 : Observations on blood copper in the sheep. Res. Vet. Sci., 9, 91 et 103-116.
- 126 - MAC HOWELL J.C. 1977 : The pathology of chronic copper poisoning in sheep. In TEMA 3 (X), p 536-539.
- 127 - MAC HOWELL J.C., EDINGTON N. and EWBANK R. 1968 : Res. Vet. Sci., 9, 160.

- 128 - MAC HOWELL J.C. and HALL 1969 : Infertility associated with experimental copper deficiency in sheep, guinea-pigs and rats. In TEMA 1 (VIII), p. 106-109.
- 129 - MAC KENZIE R.M. 1965 : Australian J. Exp. Agric. Anim. Husb., 6, 170.
- 130 - MAC PHERSON A., BROWN N.A. and HEMINGWAY R.G. 1964 : The relationship between the concentration of copper in the blood and livers from sheep. Veterinary Record, 76, 643-645.
- 131 - MAC PHERSON A. and HEMINGWAY R.G. 1969 : The relative merits of various blood analyses and liver function tests in giving an early diagnosis of chronic copper poisoning in sheep. Brit. Vet. J., 125, 213-221.
- 132 - MARCILESE N.A., AMMERMAN C.B., VALSECCHI R.M., DUNAVANT B.G. and DAVIS G.K. 1969 : Effect of dietary molybdenum and sulphate upon copper metabolism in sheep. Journal of Nutrition, 99, 177-183.
- 133 - MARCILESE N.A., AMMERMAN C.B., VALSECCHI R.M., DUNAVANT B.G. and DAVIS G.K. 1970 : Effect of dietary molybdenum and sulphate upon urinary excretion of copper in sheep. Journal of Nutrition, 100, 1399-1406.
- 134 - MATRONE G. 1969 : Studies on Copper - Molybdenum - Sulphate interrelationships. In TEMA 1 (VIII), p. 354-362.
- 135 - MILLS C.F. 1956 : The dietary availability of copper in the form of naturally occurring organic complex. Biochemical Journal, 63 (2), 190-193.
- 136 - MILLS C.F., BRENNER I., EL GALLAD T.T., DALGARNO A.C. and YOUNG B.W. 1977 : Mechanisms of the Mo/sulphur antagonism of Copper utilisation by ruminants. In TEMA 3 (X), p. 150-158.

- 137 - MILLS C.F. and DALGARNO A.C. 1969 : An evaluation of tissue cytochrome oxidase activity as an indicator of copper status. In TEMA 1 (VIII), p. 456-460.
- 138 - MILLS C.F. and DALGARNO A.C. 1972 : The influence of dietary cadmium concentration on liver copper in ewes and their lambs. Proc. Nutr. Soc., 31, 73A - 74A.
- 139 - MILLS C.F., DALGARNO A.C. and WILLIAMS R.B. 1966 : Monoamine oxidase in ovine plasma of normal and low copper content. Biochem. Biophys. Res. Comm., 24, 537.
- 140 - MITCHELL R.L. 1960 : Trace elements in Scottish soils. Minor elements in nutrition. Proc. Nutr. Soc., 19, 148.
- 141 - MITCHELL R.L. 1965 : Trace elements in soil. p. 320-328. In "Chemistry of the soil", Ed. FE Bear, Chapman and Hall, Ltd London, 1965. 519 p..
- 142 - MONTARD F. (DE) et PERIGAUD S. 1975 : Influence de quelques facteurs naturels et des facteurs d'intensification sur la composition en oligoéléments des fourrages de prairies permanentes. Dans (VI), p. 120-136.
- 143 - NEENAN M., WALSH T. and O'MOORE L.B. 1956 : Some soil and herbage factors associated with the incidence and treatment of molybdenum conditional hypocuprosis on Irish pastures. Int. Grassl. Congr., Proc. 7th Congr. New Zealand Paper, n° 31 A, p. 345-356.
- 144 - NEUMANN P.Z. and SASS-KORTZAK A. 1963 : Vox. Sang., 8, 111.
- 145 - PEDRO G. 1968 : La prospection géochimique des éléments-traces dans les sols avec établissement de cartes géochimiques superficielles (son utilisation en métallogénie et son intérêt en agronomie). Rapport Interne Agronomie I.N.R.A., 71 p..

- 146 - PERIGAUD S. 1970 : Les carences en oligoéléments chez les Ruminants en France ; leur diagnostic, les problèmes soulevés par l'intensification fourragère. Ann. Agron., 21 (5), 635-669.
- 147 - PERIGAUD S. 1971 : Liaisons carentielles entre sol, végétaux et animaux. Ann. Nutr. Alim., 25, B327-B378.
- 148 - PERIGAUD S. 1974 : Oligoéléments et qualité des fourrages : influence de la fumure minérale. Fourrage 57, 43-60.
- 149 - PERIGAUD S. 1976 : Complémentation en oligoéléments des ruminants à partir des fourrages enrichis sur pied ; I : enrichissement des fourrages. Bull. Tech., C.R.Z.V. Theix I.N.R.A., 25, 35-44.
- 150 - PERIGAUD S. et BELLANGER J. 1972 : Conséquence de l'intensification fourragère sur la composition en oligoéléments des fourrages. VIIème Congrès Mondial des Fertilisants Vienne-Baden 15, 19 Mai 1972. Ed. Druck und Verlag, Landwirtschaftlich. Chem. Bund., Vienne.
- 151 - PERIGAUD S. et BELLANGER J. 1972 : Possibilités d'enrichissement en cuivre des fourrages. Bull. Techn. C.R.Z.V. Theix I.N.R.A., 7, 17-22.
- 152 - PERIGAUD S. et COPPENET M. 1975 : Diagnostic géochimique, interférence avec la culture fourragère et son intensification. Dans (VI), p. 46-64.
- 153 - PERIGAUD S. et LAMAND M. 1973 : Carence en oligoéléments chez les Ruminants en France II : éléments d'enquête obtenus dans les élevages. Ann. Rech. Vét., 4(4), 535-563.
- 154 - PERIGAUD S., TRESSOL J.C. et AMBOULOU D. 1974 : Enrichissement en cuivre des fourrages sur pied. Académie d'Agriculture de France. Extrait du Procès-Verbal de la séance du 23 Octobre 1973, p. 1049-1071.

- 155 - PETERING H.G. 1974 : The effect of Cadmium and lead on Copper and Zinc metabolism. In TEMA 2 (IX), p. 311-325.
- 156 - PICKERING J.P. 1975 : Copper deficiency and infertility. Veterinary Record, 11, 295.
- 157 - PITT M.A. 1976 : Molybdenum toxicity, interactions between Copper - Molybdenum and sulphate. Review Agents and Actions, Vol. 6 (6), p. 758-769.
- 158 - PIZIER N.H., CALDWELL T.H., BURGESS G.R. and JONES J.L.O. 1966 : Investigations into copper deficiency in crops in east Anglia. J. Agric. Sci. Camb., 66 (3), 303-314.
- 159 - POOLE D.B.R. 1969 : Cytochrome oxidase in induced hypocuprosis. In TEMA 1 (VIII), p. 465-471.
- 160 - PORTER H. 1966 : In (XII), Ed. Academic Press, New York and London.
- 161 - PORTER H. 1969 : Neonatal hepatic mitochondriocuprein : the nature, submitochondrial localization and possible function of the copper accumulating physiologically in the liver of newborn animals. In TEMA 1 (VIII), p. 237-247.
- 162 - PRYOR W.J. 1964 : Res. Vet. Sci., 5, 123.
- 163 - REITH J.W.S. and MITCHELL R.L. 1964 : The effect of soil treatment on trace element uptake by plants. Plant analysis and fertilizer problem. Proc. IVth Colloq. Aberdeen, p. 241-254.
- 164 - RICHET G., PERIGAUD S. et LAMAND M. 1975 : Expérimentations sur la complémentation en oligoéléments ; les différents types, leurs difficultés respectives. Dans (VI), p. 162-169.

- 165 - ROESER H.P., LEE G.R., NACHT S. and CARTWRIGHT G.E.
1970 : The role of céruloplasmin in iron metabolism.
Journal of Clinical Investigation, 9-12.
- 166 - RYLEY J.W., HARVEY J.M., WATSON J.W. and LEVITT M.S.
1961 : A comparaisn of copper status of sheep and
cattle grazing a predominantly Papalum dilatatum pas-
ture in south eastern Queensland. Queensland J. Agric.
Sci., 18, 353-366.
- 167 - SASS-KORTZAK A. 1965 : Copper metabolism. Adv. Clin.
Chem., 8,1.
- 168 - SCHEINBERG H. 1966 : In (XII) p. 513-524.
- 169 - SCHLICHTING E. 1962 : Trans. Communic. IV-V. Internatio-
nal Soc. Soil Sci. New Zealand 1962, 144.
- 170 - SCHWARZ F.J. and KIRCHGESSNER M. 1974 : Intestinal ab-
sorption of copper, Zinc and Iron after dietary deple-
tion. In TEMA 2 (IX), p. 519-522.
- 171 - SMITH B.P., FISCHER G.L., POULOS P.W. and IRVIN M.R.
1975 : abnormal bones development and lameness associa-
ted with secondary Copper deficiency in young cattle.
J.A.V.M.A. Vol. 166, N°7.
- 172 - SMITH B.S.W., FIELD A.C. and SUTTLE N.F. 1968 : Effect
of intake of Copper, Molybdenum and sulphate on copper
metabolism in the sheep. III Studies with Radioactive
copper in male castrated sheep. J. Comp. Pathol. Therap.,
78, 449-451.
- 173 - SMITH B.S.W. and GAWTHORNE J.M. 1975 : The biochemical
basis of deficiencies of zinc, Manganese, Copper and
Cobalt in animals. In (XIII), p. 243-258.
- 174 - SPAIS A.G. 1959 : Le cuivre en pathologie ovine et bovine
Rec. Med. Vet. 1959, 135, 161-193.

- 175 - SPAIS A.G., AGIANNIDIS A.K., YANTSIS N.G., PAPASTERIA-DIS A.A. and LAZARIDIS T.K. 1974 : Action of cyanides and thiocyanates on copper metabolism in sheep. In TEMA 2 (IX), p. 615-617.
- 176 - SPAIS A.G., LAZARIDIS T.K. and AGIANNIDIS A.K. 1968 : Studies on sulphur metabolism in sheep in association with copper deficiency. Res. Vet. Sci., 9, 337-334.
- 177 - STARCHER B.C. 1969 : Studies on the mechanism of copper absorption in the chick. J. Nutrit., 97, 321.
- 178 - SUNDERMAN F.W., NOMOTO Jr. and S. 1970 : Measurement of human serum ceruloplasmin by its p. Phenylène-diamine oxidase activity. Clin. Chem. 16, 903-910.
- 179 - SUTHERLAND A.K., MOULE G.R., HARVEY J.M. 1955 : On the toxicity of copper glycinate injection and copper sulphate drench for sheep. Austr. Vet. Journal, 31, p. 141-145.
- 180 - SUTTLE N.F. 1973 : Effect of age and weaning, on the apparent availability of dietary copper to young lambs. Proc.Nut. Soc., 32 A, 24-25.
- 181 - SUTTLE N.F. 1974 : Effect of Molybdenum and sulphur at concentrations commonly found in ruminant diets on the availability of Copper to sheep. In TEMA 2 (IX), p. 612-614.
- 182 - SUTTLE N.F. 1975 - Trace elements interactions in animals In (XIII), p. 271-289.
- 183 - SUTTLE N.F. 1977 : Reducing the potential toxicity of copper of concentrates to sheep by use of molybdenum and sulphur supplement. Animal Feed Science and Technology, 2, 235-246.

- 184 - SUTTLE N.F. and FIELD A.C. 1968 : Effect of intake of Copper Molybdenum and sulphate on Copper metabolism in sheep. I: Clinical condition and distribution of copper in blood of the pregnant ewe. J. Comp. Path. 78, 351-362.
- 185 - SUTTLE N.F. and FIELD A.C. 1969 : Production of sway-back by experimental Copper deficiency. In TEMA 1 (VIII), p. 110 - 113.
- 186 - TAIT R.M., KRISHNAMURTI C.R., GILCHRIST E.W. and MAC DONALD D.K. 1971 : Chronic copper poisoning in feeder lambs. Can. Vet. Journ., 12 (3), 73-75.
- 187 - TAYLOR N.H., CUNNINGHAM I.J. and DAVIES E.B. 1956 : Soil type in relation to mineral deficiencies. 7th Internat. Grassl. Congr., 9 (32), 3-11.
- 188 - TODD J.R. 1969 : A survey of cattle using copper oxidase (ceruloplasmin) activity of blood serum. In TEMA 1 (VIII), p. 448-451.
- 189 - TODD J.R. 1976 : Problems of copper - Molybdenum imbalance in the nutrition of ruminants in northern Ireland. In (VII), p. 33-49.
- 190 - TODD J.R. and THOMPSON R.H. 1963 : Studies on chronic Copper poisoning II Biochemical studies on the blood of sheep during the haemolytic crisis. Brit. Vet. J., 119, 161.
- 191 - TODD J.R. and THOMPSON R.H. 1965 : Studies on chronic copper poisoning IV Biochemistry of the toxic syndrome in the calf. Brit. Vet. J., 121, 90.
- 192 - TOMPSETT S.L. 1940 : Biochemical Journal, 34, 961.
- 193 - UNDERWOOD E.J. 1976 : Molybdenum in animal nutrition In (VII), p. 9-31.

- 194 - VAN CAMPEN D.R. 1969 : Competition between Copper and Zinc during absorption. In TEMA 1 (VIII), p. 287-298.
- 195 - VAN CAMPEN D.R. 1971 : Absorption of copper from the gastrointestinal tract. In (V), p. 211-222.
- 196 - WELLS N. 1957 : New Zeal. J. Sci. Technol. 3, 884.
- 197 - WESER U. und KIRCHGEßNER M. 1965 : Vitesse de diffusion du cuivre. Z. Tierphysiol. Tierernähr. Futtermittelk 20, 34-37 et 41.
- 198 - WIENER G. and FIELD A.C. 1969 : Genetic variation in copper metabolism of sheep. In TEMA 1 (VIII), p. 92.
- 199 - YONETANI T. 1963 : In "the enzymes". Ed. Academic Press, New York and London, 1963.

LISTE DES TABLEAUX

- I - Cu-Mo dans les sols.
- II - Variation des teneurs en cuivre du sol avec la profondeur.
- III - Teneurs en Cu-Mo de quelques roches
- IV - Teneur en Cu de quelques roches françaises
- V - Répartition des carences en fonction des roches-mères
- VI - Teneurs moyennes en cuivre des prairies en France
- VII - Teneur en Cu et Mo des 3 familles de plantes prairiales
- VIII - Teneurs spécifiques en Cu selon le stade
- IX - Teneur en Cu de différentes espèces prairiales
- X - Teneur en Mo de différentes graminées
- XI - Variation du taux de Cu dans quelques espèces fourragères
suivant les variétés
- XII - Variation de la teneur en Cu de la fléole au cours du 1er cycle
- XIII - Influence du stade de récolte sur la composition en Cu-Mo de
la première récolte
- XIV - Teneurs en cuivre des premiers cycles des graminées à diffé-
rents stades de récolte
- XV - Variation de la teneur en Cu de la fléole au cours du 2ème cycle
- XVI - Influence de l'âge de la repousse au pâturage sur ses teneurs
en Cu et Mo
- XVII - Variation des teneurs en Cu des foins de prairies naturelles
selon le numéro de coupe
- XVIII - Teneurs comparées en Cuivre des foins de différentes coupes
- XIX - Teneurs comparées en Cu et Mo de fourrages premières et der-
nières coupes
- XX - Influences des conditions pédologiques en Alsace sur les teneurs
en Cu-Mo des fourrages (graminées)
- XXI - Teneur en Cu des foins de 1ère coupe dans les différents types
de sol
- XXII - Influence des facteurs naturels (lieu et année) sur les teneurs
en Cu-Mo
- XXIII - Effet de l'année sur la teneur moyenne en Cu des foins de
prairies naturelles

- XXIV - Variation des teneurs en Cu de quelques fourrages selon les années.
- XXV - Variations saisonnières des teneurs en Cu-Mo
- XXVI - Teneurs en cuivre des lères et dernières coupes de quelques fourrages sous 2 rythmes d'exploitation.
- XXVII - Influence du déprimage sur la composition en Cu des foins
- XXVIII - Influence du chaulage et de la fertilisation sur la teneur en Cu de la fétuque élevée S 170
- XXIX - Influence des amendements sur la composition Cu et Mo d'une prairie
- XXX - Influence d'un amendement de gypse et du niveau de fertilisation NPK sur les teneurs en Cu-Mo dans un pré salé
- XXXI - Influence de la fumure azotée sur la composition en Cu et Mo de quelques graminées
- XXXII - Influence de la fumure azotée sur la composition en Cu et Mo de quelques graminées
- XXXIII - Evolution des teneurs en Cuivre sur quatre ans selon le niveau de fertilisation azotée
- XXXIV - Influence de la fumure azotée sur la teneur en Cu de l'herbe
- XXXV - Influence de la dose d'azote sur la teneur en cuivre de différentes prairies naturelles
- XXXVI - Influence de la dose et de la forme d'azote sur les teneurs en cuivre du dactyle
- XXXVII - Influence de la fumure phosphatée sur les teneurs en cuivre
- XXXVIII - Influence de l'irrigation sur la teneur en cuivre d'un dactyle floréal
- XXXIX - Enrichissement en Molybdène du ray grass
- XL - Influence des différents facteurs intervenant sur la composition en Cu-Mo des espèces fourragères
- XLI - Composition en Cu-Mo de quelques aliments complémentaires pour ruminants
- XLII - Teneur en Cu-Mo du lait
- XLIII - Influence de la qualité du fourrage sur la digestibilité et la rétention du cuivre

- XLIV - Influence de la vitesse de transit sur la digestibilité et la rétention en Cu
- XLV - Influence de la terre sur la digestibilité et la rétention du Cu
- XLVI - Influence du calcium des fourrages sur la digestibilité du cuivre
- XLVII - Teneur en cuivre du foie
- XLVIII - Teneur en cuivre du sang
- XLIX - Teneur en cuivre de différents organes
- L - Seuils de carence et de toxicité comparés pour la plante et le ruminant
- LI - Influence du soufre sur la digestibilité et la rétention du cuivre
- LII - Symptômes des carences en oligoéléments chez les ruminants
- LIII - Pathogénie de la carence en cuivre
- LIV - Diagnostic analytique de la carence en cuivre
- LV - Exemple de calcul d'un complément minéral distribué à des bovins à raison de 100g/jour
- LVI - Essai d'enrichissement en cuivre d'une prairie complexe
- LVII - Effet d'un apport de cuivre au sol sur la teneur en cuivre de fourrages
- LVIII - Enrichissement en cuivre de fourrages sur pied

- LIX - Enrichissement des fourrages de prairie permanente par l'apport de cuivre au sol
- LX - Enrichissement en cuivre des fourrages par pulvérisations foliaires

LISTE DES FIGURES

- 1 - Dynamique des oligoéléments dans les sols.
- 2 - Carte des sols pauvres en Cuivre et Cobalt en France.
- 3 - Variation des teneurs en Cuivre de quelques graminées en fonction du stade.
- 4 - Variation des teneurs en Cuivre des luzernes en fonction du stade.
- 5 - Teneurs en cuivre du ray-grass italien (Westerwold) semé à différentes dates.
- 6 - Influence de la fumure azotée sur la teneur en cuivre de la 1ère coupe.
- 7 - Influence de la fumure azotée sur le taux de Molybdène.
- 8 - Biosynthèse de la céruloplasmine.
- 9 - Activité oxydasique de la céruloplasmine
- 10 - Rôle de la céruloplasmine dans le métabolisme du Fer.
- 11 - Carte des Carences en Cuivre et en Cobalt (France).
- 12 - Evolution de la cuprémie après injection de cuivre-oxyde.
- 13 - Pulvérisation foliaire de sulfate de cuivre sur fléole (Mélusine).
- 14 - Pulvérisation foliaire de sulfate de cuivre sur fétuque élevée (Lutine).
- 15 - Pulvérisation foliaire de sels de cuivre.
- 16 - Pulvérisation foliaire de sels de cuivre sur ray-grass anglais (Melle Pâture).

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	2
Chapitre I : LE CUIVRE AU NIVEAU DU SOL	5
A - Géochimie du cuivre	5
1 - Les formes du cuivre dans le sol	5
a - Produits d'altération de la roche	
b - Sites et mobilité du cuivre	
c - Equilibres entre les différentes formes	
d - Facteurs d'équilibre	
2 - Fraction absorbable par les plantes	11
3 - Conséquences sur les analyses de sols	11
a - Variation de la composition dans le temps et dans l'espace	
b - Analyse et interprétation	
B - Les régions géochimiques	13
1 - Les Roches-mères	13
a - Les roches éruptives = ignées	
b - Les roches sédimentaires	
c - Les roches métamorphiques	
d - Résumé	
2 - Les sols (types pédologiques)	19
C - Aires de carence en Cuivre	21
1 - Les types de sols carencés	23
a - Les carences primaires en cuivre	
b - Les carences secondaires dues à un excès de molybdène	
2 - Les aires de carence primaire en cuivre et cobalt en France	25
a - Sur des roches éruptives acides	
b - Sur des roches volcaniques basiques altérées	
c - Sur des sédiments détritiques acides	
d - Sur des sédiments calcaires	

e - Sur des sédiments détritiques calcaires plus ou moins décarbonatés	
3 - Les aires de carences en cuivre induites par un excès de molybdène	28
a - La géochimie du molybdène	
b - Les conditions en France	
4 - Valeur et limites de la cartographie des carences	29
a - Valeur	
b - Les limites	
 Chapitre II : LE CUIVRE DANS LES ALIMENTS	33
A - Le cuivre dans les fourrages	33
1 - Rôle du cuivre dans la plante	33
a - Rôle	
b - Les symptômes de carence	
c - Les symptômes de toxicité	
2 - Teneurs en Cuivre (et molybdène)	35
3 - Influence des facteurs liés à la plante	39
a - Le potentiel génétique	
b - Partie de la plante	
c - Stade végétatif, stade de récolte	
d - Repousses et numéros de cycle	
4 - Influence des facteurs d'environnement	60
a - Le complexe sol - climat	
b - Le climat de l'année	
c - La saison	
5 - L'influence des Techniques d'Exploitation et des Techniques Culturelles	69
a - Le mode d'exploitation, de récolte, de conservation, la date du semis	
b - Les Amendements	
c - Fertilisation en éléments majeurs	
d - Fertilisation en oligo-éléments	
6 - Conclusions	99
a - Importance relative des différents facteurs	
b - Conséquences de l'intensification fourragère sur l'alimentation animale	

B - Le cuivre dans les aliments complémentaires	101.
C - Cas du lait	103
Chapitre III : LE CUIVRE CHEZ LE RUMINANT	107
A - Digestibilité -Rétention	107
1 - Rappel de définitions	107
2 - Digestibilité du cuivre	108
a - Mesure	
b - Résultats	
3 - Facteurs de variation de la digestibilité et de la rétention du cuivre	109
a - La teneur de la ration	
b - Influence de la qualité de la ration	
B - Métabolisme et Biochimie	116
1 - Métabolisme	116
a - Absorption	
b - Excrétion	
c - Transport	
d - Schéma du métabolisme du cuivre	
2 - Teneurs en cuivre des tissus et liquides bio- logiques	122
a - Répartition	
b - Teneur en cuivre du foie	
c - Teneur en cuivre du sang	
d - Teneur en cuivre du poil	
e - Teneur en cuivre du lait	
f - Teneur en cuivre de différents organes	
3 - Biochimie du cuivre	137
a - Forme du cuivre dans les tissus	
b - Rôle biochimique du cuivre	
4 - Interrelations entre oligoéléments	147
a - Relations cuivre - fer	
b - Relations cuivre - cobalt	
c - Relations cuivre - zinc, cuivre - cadmium, cuivre - plomb.	

d - Relations cuivre - molybdène - soufre	
5 - Les besoins en cuivre - la toxicité	153
a - Les besoins	
b - Le seuil de toxicité	
C - Pathologie liée au cuivre chez les ruminants	161
1 - Etude clinique de la carence en cuivre	161
a - Les symptômes	
b - Les lésions	
c - Pathogénie	
2 - Etude clinique de la toxicité chronique du cuivre	170
a - Etiologie	
b - Symptômes	
c - Lésions	
d - Pathogénie	
D - Diagnostic de la carence en cuivre	174
1 - Les commémoratifs	174
2 - Le diagnostic clinique	175
3 - Le diagnostic nécropsique	177
4 - Le diagnostic analytique	177
a - Au niveau du sol	
b - Au niveau de l'alimentation	
c - Les dosages plasmatiques	
d - Les dosages tissulaires	
e - Les dosages enzymatiques	
5 - Le diagnostic thérapeutique	188
E - Pronostic	189
1 - Le pronostic médical	189
2 - Le pronostic économique	190
a - Les pertes économiques indirectes	
b - Les pertes économiques directes	

Chapitre IV - PROPHYLAXIE ET TRAITEMENT	193
A - Traitement de la carence en cuivre	193
1 - Administration d'un sel de cuivre per os	193
a - Le sulfate de cuivre	
b - L'oxyde de cuivre	
2 - Les formes injectables	195
a - Le sulfate de cuivre	
b - Le glycinate de cuivre	
c - Cu - Ca - EDTA	
d - Le méthionate de cuivre	
e - L'oxyde de cuivre	
B - Prophylaxie de la carence en cuivre	202
1 - Intervention au niveau de l'animal	202
a - Complémentation du régime par un condiment minéral approprié	
b - Les pierres à lécher	
2 - Intervention au niveau sol-plante	207
a - Enrichissement par apport de cuivre au sol	
b - Enrichissement par pulvérisations foliaires	
C - Prophylaxie et traitement de l'intoxication cuprique chronique	228
1 - Prophylaxie	228
a - En France	
b - A l'étranger	
2 - Le traitement	
CONCLUSION	231
Bibliographie	233
Liste des Tableaux	257
Liste des figures	260

IMPRIMÉ au C.R.D.P. LYON

